DEZEMBER 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Hilfe bei Schizophrenie?

> Gasscheiben im All

> Genie des Orients: Alhazen

> Verkanntes Karthago

▶ NOBELPREISE 2004

www.spektrum.de

MEDIZIN

Die Verheißung von Stammzellen

Im Schatten ethischer Kontroversen ringen Forscher um den besten Weg zur Therapie

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €

4 194058 406900 12



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Ethische Medikamente und ethische Medizin

Malaria ist mit 300 Millionen jährlichen Neuerkrankungen die häufigste Tropenkrankheit, an der laut Weltgesundheitsorganisation WHO pro Jahr rund eine Million Menschen sterben. Andere Erhebungen halten eher drei Millionen Malariatote für wahrscheinlich – allein in Afrika. Trotz zunächst erfolgreicher Bekämpfungsprogramme ist diese Krankheit weltweit wieder auf dem Vormarsch – auch bei uns. So gab es in Deutschland im Jahr 2001 über tausend Malariafälle mit acht Toten.

Mit zu der Misere trägt bei, dass einerseits in den letzten 15 Jahren Malariaparasiten resistent gegen das einst bewährte Mittel Chloroquin wurden, andererseits in vielen Ländern neue, aber teure Medikamente, die solche Resistenzen umgehen, nicht bezahlt werden können. Die WHO empfiehlt daher bestimmte Kombipräparate, so genannte ACTs *(artemisinin combination therapies)*, gegen Malaria, Aids und Tuberkulose. Das Problem: ACTs sind mit 1 bis 2,5 Dollar pro Dosis zwanzigmal so teuer wie Chloroquin. Daher wird das alte Mittel noch in Gegenden verwendet, wo es bekanntermaßen nutzlos ist.

Der Heidelberger Malariaforscher Heiner Schirmer schildert, wie die Industrieländer und Pharmafirmen mit diesen Problem umgehen und umgehen sollten (S. 110). Seine beklagten »Defizite der Verteilungsethik in der Wissenschaft« sind allen Beteiligten bewusst. Manche Firmen wären wohl durchaus bereit, solche Medikamente billiger oder gratis abzugeben, wenn diese nicht zum Teil über den Schwarzmarkt in die Herstellerländer zurückverkauft würden. Gleichwohl, konstatiert Schirmer hoffnungsvoll, stünden derzeit »ethische Präparate« und »ethische Medizin« vor einem Come-back.

Stammzellen ohne Ende: Auch die Ethikdebatte um diese mutmaßlichen Heilsbringer läuft weiter, als hätte es das Stammzellgesetz von 2002 nicht gegeben. Der Diskurs über das Klonen zwecks Gewebezucht, also dem Foschungsklonen mit dem Ziel des therapeutischen Klonens, kulminierte kürzlich in dem Votum des Nationalen Ethikrats. Das hochrangig besetzte Gremium empfahl – außer der Ablehnung des reproduktiven Klonens – beim Forschungsklonen ein Moratorium. Einige prominente Ratsmitglieder plädierten für die Beibehaltung des Verbots, andere für die begrenzte Zulassung. Das ist kein kluger Rat, sondern eine Ohnmachtserklärung.

Sollen deutsche Stammzellforscher nicht wieder international ins Hintertreffen geraten wie einst bei der Genetik und dem Humangenomprojekt, dann muss auch die Politik reagieren. Zweifellos ist der Kompromiss zwischen Ethik und Forschungsfreiheit hier besonders heikel. Aber es abermals »dem Ausland zu überlassen« und hinterher davon profitieren, kann keine verantwortliche Haltung sein (S. 34).



PS.: Nächste Woche kommt unser Spektrum Spezial »Forschung und Technik in der Renaissance« an die Kioske. Als Nachfolger unseres Spezials »Wissenschaft und Technik im Mittelalter« gehen wir diesmal der Zeit nach, welche die Aufklärung vorbereitete – ein Prozess, der auch heute noch nicht abgeschlossen ist. Umso wichtiger, meine ich, sich seiner Wurzeln gewärtig zu werden.

I N H A L T

DEZEMBER 2004

SPEKTROGRAMM

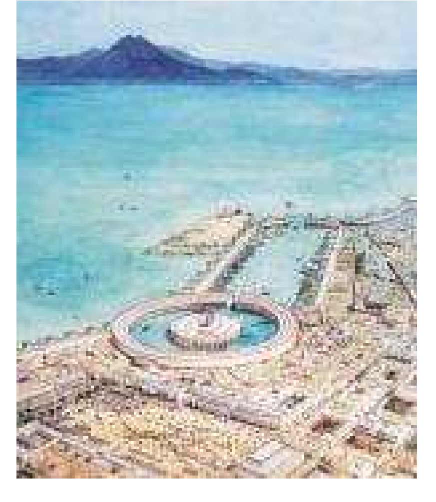
FORSCHUNG AKTUELL

▶ NOBELPREISE 2004

THEMEN

Titelbild: Ein geöffneter menschlicher Keim im 100-Zellen-Stadium: Viele Patienten hoffen auf Heilung durch embryonale Stammzellen.
Yorgos Nikas / Wellcome Library MPL

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 26

ARCHÄOLOGIE

Karthago – antikes Reich des Bösen?

Hinterhältig seien die Punier gewesen und Kindermörder obendrein: So verbreitete es die römische Propaganda. Woher rührte der Hass auf Karthago?



SEITE 44

ASTROPHYSIK

Ein Universum voller Scheiben

Neue Forschungen geben einen Einblick in die turbulente Dynamik von Akkretionsscheiben, die junge Sterne und Schwarze Löcher umkreisen

SEITE 52

ERDBEBEN

Ein See als Seismograf

In der Schweiz traten in den vergangenen 15000 Jahren mehrere verheerende seismische Erschütterungen auf. Das verraten Ablagerungen im Vierwaldstättersee



SEITE 62

SCHIZOPHRENIE

Wenn Hirnsignale verrückt spielen

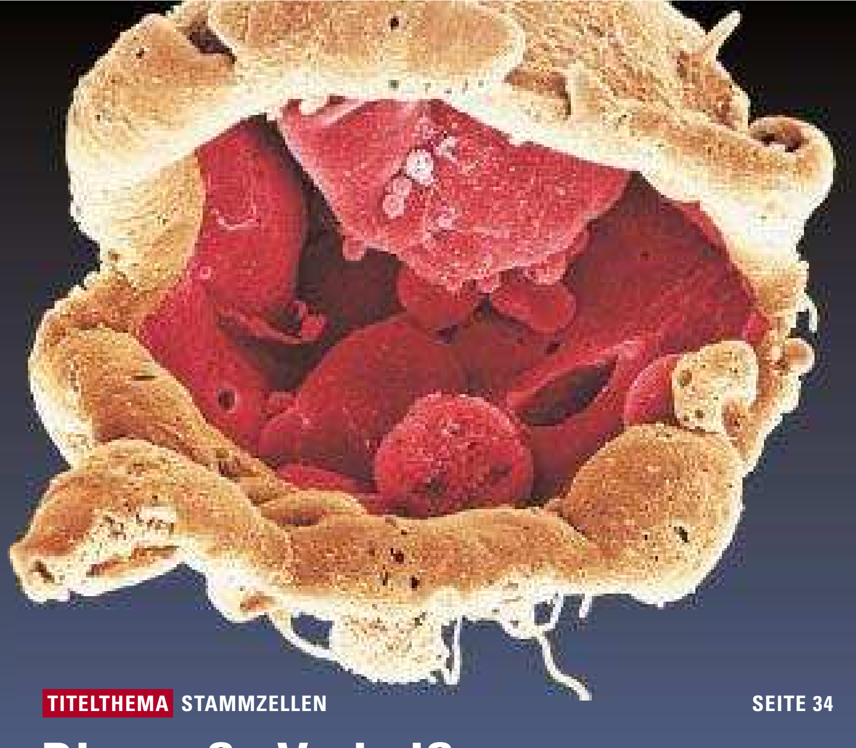
Bei Schizophrenie entgleisen Kommunikationsnetzwerke des Gehirns. Die Hauptschuld daran könnte ein bisher vernachlässigter Signalstoff tragen



UMWELTMEDIZIN SEITE 74

Die Arsen-Katastrophe von Bangladesh

Weltweit drohen 50 Millionen Menschen Arsenvergiftungen durch Trinkwasser – die größte Massenvergiftung der Geschichte



TITELTHEMA STAMMZELLEN SEITE 34

Die große Verheißung

Wenn alle Restriktionen zur Stammzellforschung fielen – wären die Wissenschaftler überhaupt so weit, sogleich anwendbare Therapien zu entwickeln?

SEITE 82

RAUMFAHRT

Magnetantrieb für Raumfahrzeuge

Einfache Metallseile könnten Raumfahrzeuge mit billigem Strom versorgen. Dahinter stecken elementare Naturgesetze aus Mechanik und Elektrodynamik



SEITE 90

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Alhazen: Physik am Rande des Irrsinns

Der muslimische Gelehrte legte im 10. Jahrhundert die Grundlagen für Optik und Astrophysik

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 110

ESSAY

Medikamente für die Armen

Die Biomedizin des 21. Jahrhunderts darf nicht nur für die Minderheit der Wohlhabenden forschen

D E Z E M B E R 2 0 0 4

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN



SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Die Sternwarte La Specola

Eintauchen in die Vergangenheit der italienischen Astronomie – Bologna ist eine Reise wert

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Das Ende des Raumschiffs Erde

Oktober 2004

Maximale Existenzdauer

Drei Punkte sind mir in dem sehr interessanten Artikel aufgefallen:

1. Gibt es auch unter den Bäumen Arten, die die C4-Methode beherrschen? *(Antwort der Redaktion: Nein)*

2. Es wurden die erst vor wenigen Jahren entdeckten Bakterien in der Erdkruste, tief unter der Erdoberfläche, nicht erwähnt. Meines Erachtens haben diese gute Chancen, selbst das vollständige Verdampfen der Erdozeane noch um eine beträchtliche Zeit zu überleben.

3. Selbst bei optimistischer Schätzung heißt das für die Erde, dass nur noch für 100 bis maximal vielleicht 200 Millionen Jahre auch intelligentes Leben biologisch möglich erscheint. Das würde die maximale Existenzdauer desselben auf deutlich unter 5 Prozent der Lebensdauer des Sonne-Erde-Systems beschränken.

Diese Abschätzung ist höchst relevant für die Frage nach intelligentem außerirdischem Leben und seiner Entdeckungswahrscheinlichkeit, auch wenn andere Sterne und Planeten möglicherweise etwas bessere Zeitskalen mitbringen (»späte« G-Typen leben länger, andere Kombinationen von Sternabstand und Planetenmasse könnten günstiger sein).

Stefan Urbat, Stuttgart

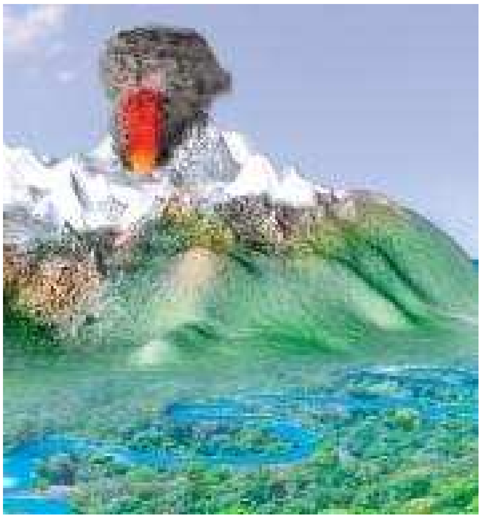
Das Ganze im Blick haben

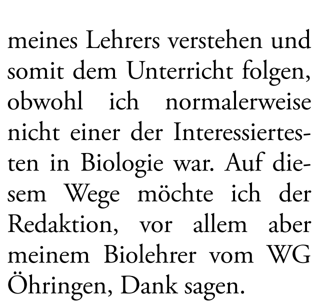
Bei dem bisherigen Anstieg der Sonnenhelligkeit dürften heute schon recht kleine zusätzliche Mengen des Treibhausgases in der Atmosphäre eine umso gefährlichere Wirkung haben. Vor 500 Millionen Jahren, als die Sonne etwas schwächer schien als heute, hätte man, aber nur bei gleicher Zusammensetzung der Lufthülle, CO_2 vielleicht unbedenklicher verblasen können, wobei es jedoch nie ratsam ist, in das empfindliche atmosphärische Geschehen einzugreifen.

Veröffentlichte Klimaprognosen für die nahe Zukunft sollten daher die gemeinsame Entwicklung von Sonne, Biosphäre und Klima stärker einbeziehen.

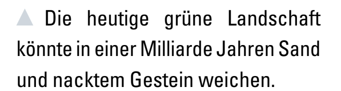
Als historischer Wissenschaftler sehe ich eine Parallele zur Geschichte: Die Gegenwart kann nicht losgelöst von der Vergangenheit verstanden werden. Erst die Beschäftigung mit der Erdgeschichte und -zukunft dürfte ein umfassenderes Verständnis unserer Epoche vermitteln, die ja nur ein Abschnitt im Fluss gewaltiger Zeiträume ist.

Anton Vogel, München





BEIDE GRAFIKEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

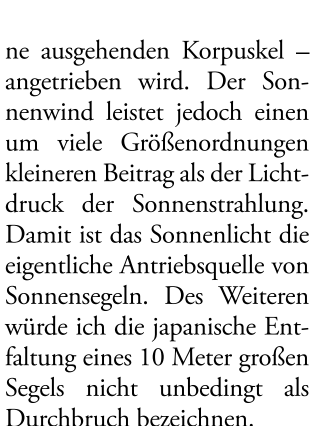


▲ Die heutige grüne Landschaft könnte in einer Milliarde Jahren Sand und nacktem Gestein weichen.

Origami im All

Spektrogramm, Oktober 2004

In diesem Beitrag sind Sie dem leider verbreiteten Irrtum aufgesessen, dass ein Sonnensegel durch den Sonnenwind – also durch die von der Sonne ausgehenden Korpuskel – angetrieben wird. Der Sonnenwind leistet jedoch einen um viele Größenordnungen kleineren Beitrag als der Lichtdruck der Sonnenstrahlung. Damit ist das Sonnenlicht die eigentliche Antriebsquelle von Sonnensegeln. Des Weiteren würde ich die japanische Entfaltung eines 10 Meter großen Segels nicht unbedingt als Durchbruch bezeichnen.



Bereits im Februar 1993 wurde ein ähnliches, jedoch 20 Meter großes Segel an einem russischen Progress-Modul im Weltraum entfaltet (Znamya-2) und auch am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln wurde im Dezember 1999 ein 20 Meter großes Sonnensegel erfolgreich unter simulierten Schwerelosigkeitsbedingungen am Boden entfaltet.

Dr. Bernd Dachwald, Köln

Anregung des Biologielehrers

Als mir mein Biolehrer von dieser Zeitschrift berichtete, wusste ich nicht so recht, was ich davon halten sollte. Ich war zuerst sehr skeptisch. Doch als ich mir mehrmals vor dem Unterricht die Artikel durchlas, wurde mir ganz anders – ich konnte auf einmal die Gedankensprünge meines Lehrers verstehen und somit dem Unterricht folgen, obwohl ich normalerweise nicht einer der Interessiertesten in Biologie war. Auf diesem Wege möchte ich der Redaktion, vor allem aber meinem Biolehrer vom WG Öhringen, Dank sagen.

Peter Storz, per E-Mail

Künstliche Biomaschinen

Oktober 2004

In der Mikrobiologie versteht man unter Klonierung die Vermehrung und/oder Ausprägung fremder Gene in Mikroorganismen. Der Artikel macht überhaupt nicht klar, worin der Unterschied zwischen »synthetischer Biologie« und der guten alten Kloniererei besteht. Damit ist auch der »Missbrauchs«-Teil Unfug, da gentechnisches Arbeiten global gesetzlich geregelt ist, in Deutschland mit dem Gentechnikgesetz sogar besonders fein.

Stattdessen hätte herauskommen müssen, dass wir mittelfristig in der Lage sein werden, aus einer beliebigen Aminosäuresequenz Funktion und Mechanismus des resultierenden Enzyms zu berechnen. Ebenso werden wir vermutlich bald verstehen, wie aus der Interaktion von ein

paar tausend Proteinen und RNAs Leben resultiert. Dieser Forschungsansatz begann vor einigen Jahren und wird Bionomie, holistische Biologie und auch synthetische Biologie genannt. Der hier zu erwartende Erkenntnisfortschritt und die ihm folgenden Anwendungen wären dann wirklich eine weitere biologische Revolution.

Im Vorspann schreiben Sie, künstliche Mikroorganismen sollen Schwermetalle abbauen. Es sollte klar sein, dass chemische Elemente, sofern es sich um stabile Isotope handelt, nur im Kernreaktor abgebaut werden können. Ganz bestimmt aber geht das nicht durch gentechnisch veränderte Bakterien.

Prof. Dietrich H. Nies, Halle

Çatal Hüyük – Stadt der Frauen?

September 2004

Wo bleibt die Mär? Ihr Bericht schildert ein blühendes Matriarchat mit Egalität in den sozialen Beziehungen, ohne Herrschaft! Kann Ian Hodder den wunderbaren Wald vor lauter Bäumen nicht sehen? Oder kennt er nicht die feministische Definition des Matriarchats mit den Begriffen Konsensgesellschaft, Fürsorge und Egalität?

Gudrun Nositschka, Mechernich

Dunkle Energie bremst Computer aus

Forschung aktuell, Oktober 2004

Der Gedanke, die gesamte Energie des Universums zur möglichst langen Aufrechterhaltung des Moore'schen Gesetzes zu verwenden, ist schon fantastisch. Wenn man auch großzügig über Feinheiten hinwegsieht, so wird es nicht 600 Jahre (400 Zyklen) der Leistungsverdoppelung bis zum Verbrauch aller verfügbaren Resourcen des Universums geben können.

Der Grund hierfür liegt in der steigenden Energiedichte im Arbeitsvolumen der Hardware. Ab einer kritischen Dichte wird durch das Masseäquivalent des Energiestroms ein Schwarzes Loch entstehen und die Rechenvorgänge entsprechend »ausschalten«.

Bei heutigen handelsüblichen Chips sind die Energieflüsse vergleichsweise klein, zum Beispiel 20 Watt bei einer Schichtdicke von 100 nm. Da der Verkleinerung Grenzen gesetzt sind, muss die Leistung entsprechend ansteigen. Überschlagsmäßig wird demnach von gegenwärtiger Leistung ausgehend bereits nach 245 Jahren ein Schwarzes Loch erzwungen (bei heutiger Chipgröße). Würde man jedoch große, räumliche Hardware bauen, beispielsweise in einer Kugel von 3 Kilometer Radius, so käme das Ende noch eher: nach zirka 175 Jahren entstünde ein Schwarzes Loch wegen der größeren räumlichen Ansammlung der Energie/Masseäquivalente mit dem entsprechenden Schwarzschildradius.

Außerdem wird eine hohe Energiedichte zur spontanen Entstehung von Elementarteilchen führen. Der so erzeugte Teilchenstrom dürfte die Hardware ziemlich rasch zerstören. Wahrscheinlich kommt es gar nicht erst zur Bildung von Schwarzen Löchern.

Der Autor hat also Recht, wenn er am Ende seiner Ausführungen bemerkt: Das Ende wird viel früher kommen.

Dr. Holger Casselmann, Odenthal

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Bandwürmer – Zeugen der Menschwerdung

Essay, Oktober 2004

Bei der Nutzung tierischer Nahrung, speziell bei der Erschließung des Schweins als Jagdbeute, bekam der Mensch es bekanntlich mit einem anderen, wesentlich gefährlicheren Parasiten zu tun als mit den genannten Vertretern der Cestodes, nämlich der Trichine. *Trichinella spiralis* aus der Gruppe der Nematoden kann beim Menschen schwere Erkrankungen bis hin zum Tode verursachen. Da frage ich mich, warum hier offenbar keine »gedeihliche Koevolution« stattgefunden hat.

In diesem Zusammenhang hätte ich auch über die Bedeutung des Feuers für die Zubereitung der (tierischen) Nahrung gerne etwas erfahren. Mit dem Feuer hatte der Mensch doch neben vielen anderen Vorteilen auch die Möglichkeit, Nahrung zu sterilisieren.

Christian Krippenstapel, Hildesheim

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Olaf Fritsche, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Hans Zekl.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, 22706708 (BLZ 600 700 70)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and

PALÄONTOLOGIE

Mit langem Hals auf Beutefang

Als Schönheit kann man *Dinocephalosaurus orientalis* nicht gerade bezeichnen. Der stark gestreckte Hals des Reptils, das vor über 230 Millionen Jahren in den Meeren hauste und dessen Überreste vor der südchinesischen Küste entdeckt wurden, war mit 25 Wirbeln und 1,7 Metern fast doppelt so lang wie der Rumpf. Diese ungewöhnliche Anatomie kam dem Urzeitriesen jedoch bei der Jagd auf Fische und Sepien zustatten. Anhand seines Skeletts haben Wissenschaftler um Chun Li von der chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking nun rekonstruiert, wie das Reptil Beute machte. Es dürfte den vorgestreckten »Giraffenhals« genutzt haben, um sich unbemerkt anzuschleichen. Dann spannte es ruckartig seine Halsmuskeln an, sodass sich die Halsrippen nach außen spreizten und das Rachenvolumen sich vergrößerte. Der resultierende Unterdruck erzeugte einen Sog, der die Beute ins geöffnete Maul des Kolosses spülte. Die Opfer ahnten wohl bis zuletzt nichts von der Gefahr, da sie den kleinen Kopf ihres Feindes vermutlich als harmlos einstuften und den Rumpf erst wahrnahmen, wenn es schon zu spät war. *(Science, 24.09.2004, S. 1931)*

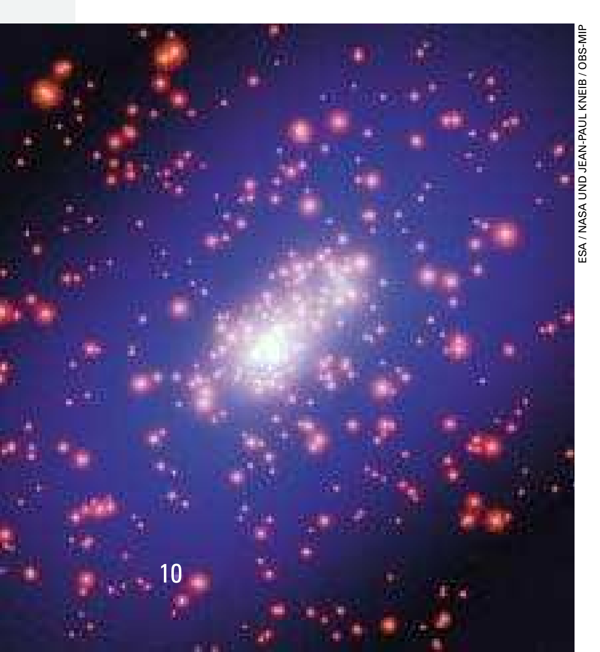
Mit seinem langen Hals konnte der Urzeitriese *Dinocephalosaurus orientalis* den nur 15 Zentimeter breiten Kopf vermutlich unbemerkt bis dicht an seine Beute bringen.

ASTRONOMIE

Früher Kosmos im polarisierten Licht

Rund 380000 Jahre nach dem Urknall vereinigten sich Atomkerne und Elektronen, die bis dahin ein Plasma gebildet hatten, zu neutralen Atomen. Dadurch wurde das junge Universum durchsichtig und leuchtete plötzlich auf. Als Relikt dieses Lichtblitzes gibt die kosmische Hintergrundstrahlung Auskunft über die damaligen Verhältnisse im Weltall. So weisen örtliche Schwankungen in dieser Strahlung auf die Existenz von Dichtefluktuationen hin, aus denen sich später die Galaxien entwickelt haben. Ursache der Inhomogenitäten muss die so genannte Dunkle Materie gewesen sein, von der die Physiker noch nicht genau wissen, woraus sie besteht.

Forscher um Anthony Readhead vom Californian Institute of Technolgy (Caltech) konnten dieses Bild nun bestätigen. Sie vermaßen mit dem Teleskop »Cosmic Background Imager« die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung und entdeckten dabei gleichfalls Fluktuationen. Diese rühren aber nicht von Dichte-, sondern von Geschwindigkeitsschwankungen her. Sie beweisen somit, dass sich das Material an den Verdichtungen bereits zusammenzog. Dazu passt auch eine charakteristische (Phasen-)Verschiebung zwischen dem Spektrum der Dichte-Inhomogenitäten und dem der Polarisationsschwankungen: In einer kontrahierenden Wolke ist die Dichte im Zentrum maximal, die Geschwindigkeit dagegen am Rand.
(Science, 29.10.2004, S. 836)



ESA / NASA UND JEAN-PAUL KNEIB / OBS-MIP

Die Verteilung Dunkler Materie (blau) im Galaxienhaufen Cl0024+1654

GENETIK

Die Evolution der Homosexualität

Gibt es ein Gen für Homosexualität? Und wie konnte es sich in der Evolution behaupten, obwohl gleichgeschlechtliche Paare keine Nachkommen hervorbringen und ihre Veranlagung somit auch nicht vererben? Auf der Suche nach Antworten fragten Forscher um Andrea Camperio-Ciani von der Universität Padua 100 hetero- und 98 homosexuelle Männer über ihre Verwandtschaft aus. Die statistische Analyse der Daten bestätigte frühere Hinweise, wonach eine Neigung zur Homosexualität über das X-Chromosom der Mutter vererbt wird. Homosexuelle Söhne gab es nämlich besonders häufig, wenn in der mütterlichen Linie noch andere homosexuelle Verwandte existierten. Zudem hatten weibliche Vorfahren homosexueller Männer mütterlicherseits im Durchschnitt mehr Kinder als solche aus der väterlichen Sippe. Demnach dürfte die Veranlagung für Homosexualität mit einer erhöhten Fruchtbarkeit bei Frauen gekoppelt sein. Dies würde die fehlenden Nachkommen aus den gleichgeschlechtlichen Partnerschaften der Söhne ausgleichen. *(Proceedings of the Royal Society of London B, FirstCite 18.10.2004)*

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

PARASITISMUS

Wespe mit selbst gebastelter Biowaffe

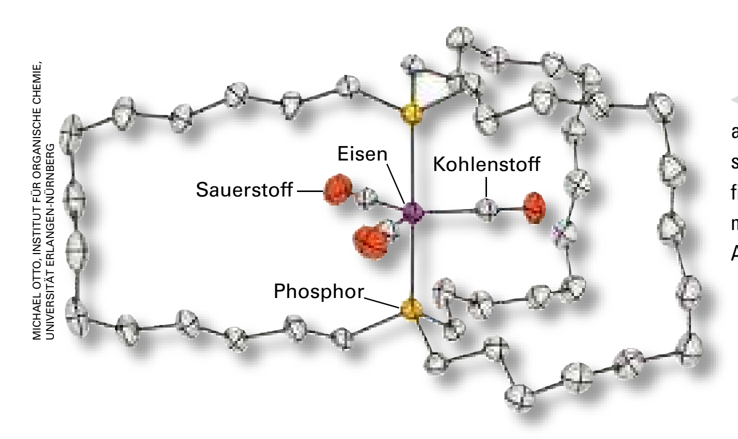
Schlupfwespen legen ihre Eier in Raupen, die dann als lebendige Speisekammer für die Larven dienen. Um den Erfolg des heimtückischen Manövers zu sichern, injizieren manche Räuber zusätzlich Viren als trickreiche Biowaffen. Die von diesen erzeugten Proteine unterdrücken das Abwehrsystem des Wirts, damit es die Eier nicht bekämpft, und sorgen zugleich dafür, dass sich die Raupen nicht verpuppen und den Larven als Brutstätte erhalten bleiben. Für die Schlupfwespe sind die Viren harmlos: Sie vermehren sich ausschließlich in ihren Eierstöcken.

Als Eric Espagne und seine Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Insektenbiologie in Tours nun bei der Schlupfwespe *Cotesia congregata* die DNA dieser Biowaffe analysierten, entdeckten sie Erstaunliches. Das Erbgut der Viren erwies sich nämlich nicht nur als extrem umfangreich, sondern enthielt auch überhaupt keine virustypischen Gene. Mehr als siebzig Prozent der DNA war sogar sinnloser Buchstabensalat, wie er nur im Genom höherer Organismen vorkommt. Die Forscher vermuten deshalb, dass es sich gar nicht um echte Viren handelt, sondern um Konstrukte aus mobilen DNA-Elementen, die von den Wespen selbst zusammengebastelt und in eine geborgte Virushülle gesteckt wurden.

(Science, 8.10.2004, S.286)

NANOTECHNIK

Molekularer Motor



◄ Drei Rotorblätter aus Carbonylgruppen sind in einem Gitterkäfig über ein Eisenatom mit einer drehbaren Achse verknüpft.

Chemiker von der Universität Erlangen-Nürnberg haben den ersten Spielzeugkreisel im Nanoformat geschaffen. Ein Eisenatom im Zentrum bildet zusammen mit zwei sich gegenüberstehenden Phosphoratomen die Drehachse. Senkrecht zu ihr spreizen sich drei Carbonylgruppen (CO) wie die Rotorblätter eines Hubschraubers vom Eisenatom ab. Ausladende Kohlenwasserstoffhenkel an den Phosphoratomen spannen einen Käfig auf, in dem der Motor sich dreht. Bei der Synthese der Verbindung entstehen allerdings keine einzelnen Kreisel, sondern Kristalle, in denen die Rotoren parallel in Schichten neben- und übereinander gestapelt sind. Die Einzelteile des Miniatur-Brummkreisels sind modifizierbar. So lässt sich die Größe der Henkel variieren.

Außerdem gelang es Takanori Shima, Frank Hempel und John Gladysz, eines der drei Carbonyl-Rotorblätter gegen eine Nitrosylgruppe auszutauschen. Das dadurch induzierte elektrische Dipolmoment sollte es erlauben, den Kreisel durch ein elektrisches Wechselfeld von außen gezielt zu steuern. Bisher dreht er sich, angeregt durch thermische Energie, nur in zufällige Richtungen.

(Angewandte Chemie, 13.10.2004, S. 5531)

▼ Die Larven der Schlupfwespe *Cotesia congregata* spinnen ihre Konkons auf der Raupe des Tabakschwärmers, in der sie zuvor herangewachsen sind.



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Fundamente eines Gebäudes in der mongolischen Provinz Hentiy, das seine Entdecker für das Mausoleum von Dschingis Kahn halten

ARCHÄOLOGIE

Mausoleum von Dschingis Khan entdeckt?

Im Bereich einer Fundstätte 250 Kilometer östlich von Ulan Bator, an der ein japanisch-mongolisches Team schon seit 2001 Palastruinen von Dschingis Khan und seinem Sohn ausgegraben hat, sind die Archäologen nun auf die Fundamente eines Gebäudes gestoßen, das sie als Mausoleum des berühmt-berüchtigten Mongolenherrschers deuten. In diesem Monument sollen einst die Totenrituale vollzogen worden sein. Lage und Grundriss entsprechen Beschreibungen in alten chinesischen und persischen Chroniken. Außerdem entdeckten die Forscher von der Kokugakuin-Universität in Tokio, der Universität Niigata und der Mongolischen Akademie der Wissenschaften vier 1,5 Meter breite Gruben mit Asche und verkohlten Knochen von Pferden, Schafen und anderen Tieren. Laut alten chinesischen Berichten wurden nach dem Tod eines mongolischen Herrschers drei Jahre lang täglich Tiere geopfert und vergraben.

Die Forscher hoffen nun, in der Nähe das sagenumwobene Grab von Dschingis Khan zu finden, das wertvolle Schätze bergen soll. Nach mongolischer Tradition werden die Gebeine eines verstorbenen Herrschers in der Nähe des Mausoleums bestattet – üblicherweise im Umkreis von drei bis zwölf Kilometern.

VERHALTEN

Pfeilschnelle Schnecke

Die Rote Wegschnecke mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zu filmen wäre sicherlich übertrieben. Nicht so bei der Kegelschnecke *Conus catus*; denn sie angelt sich ihre Beute in Blitzesschnelle. Um die bisher nicht im Detail bekannte Jagdszene in Zeitlupe aufzuzeichnen, setzten Joseph Schulz und seine Kollegen von der Stanford-Universität in Kalifornien eine der dämmerungsaktiven Wasserschnecken zusammen mit einem Beutefisch in einen Trog.



JOSEPH R. SCHULZ, OCCIDENTAL COLLEGE, LOS ANGELES

Sobald das Tier auf sein Opfer aufmerksam geworden war, stülpte es sein durchsichtiges Schlundrohr nach außen, bis es den Fisch damit berührte. In weniger als einer Drittelsekunde zog sich dann der Rüssel zusammen und schleuderte gleich einer Harpune einen hohlen, pfeilförmigen Zahn in den Körper der Beute, wo er ein schnell wirkendes Gift injizierte. Wie an einer Angel konnte das Weichtier so schließlich sein Nachtmahl in seine Mundhöhle ziehen, um es dort in Ruhe vorzuverdauen. Unklar bleibt allerdings der Abschussmechanismus für die Pfeile. *(The Biological Bulletin, 1.10. 2004, S. 77)*

◀ Die Kegelschnecke *Conus catus* ertastet ihre Beute mit dem Schlundrohr und harpuniert sie dann blitzschnell mit einem pfeilförmigen Zahn.

PHYSIK

Schneller Schleimschwimmer

Nun scheint sie entschieden, die alte Debatte zwischen Christiaan Huygens und Isaac Newton: Der niederländische Kollege des englischen Entdeckers der Gravitation hatte Recht mit seiner Behauptung, dass Menschen in Schleim genauso schnell schwimmen wie in Wasser. Edward Cussler von der Universität von Minnesota in Minneapolis machte kurzerhand die Probe aufs Exempel. Er löste in einem Schwimmbecken 300 Kilogramm Guargummi und überredete seinen Studenten Brian Gettelfinger, einen Leistungsschwimmer, zu einem Bad in der breiigen Brühe.

Der Athlet kam darin flott voran: Welchen Schwimmstil er auch benutzte, er war nur gut vier Prozent langsamer als in klarem Wasser. Cussler erklärt das damit, dass zwei entgegengesetzt wirkende Faktoren einander weit gehend aufheben. Zwar müsse ein



UNIVERSITY OF MINNESOTA

Der Schleimschwimmer in Aktion

Schleimschwimmer mehr Reibungswiderstand überwinden, erreiche in der dickflüssigen Masse aber eine größere Schubkraft. Entscheidend seien seine Stromlinienform und Größe. Ein Bakterium, so Cussler, werde in Sirup wohl nicht so schnell ans Ziel kommen wie in Wasser. *(American Institute of Chemical Engineers Journal, Bd. 50, S. 2646)*

Mitarbeit: Katharina Grund und Stephanie Hügler



JESSE ALLEN, NASA EARTH OBSERVATORY

Sägeblatt-Gletscherzunge

Der größte und aktivste Vulkan der Antarktis ist der 3796 Meter hohe Mt. Erebus auf Ross Island. Sein 250 Meter breiter innerer Gipfelkrater enthält einen See aus geschmolzener, rot glühender Lava. Auf der Außenseite befindet sich dagegen ein ausgedehntes System aus Gletschern, von denen die meisten bis zum Rand der Insel reichen. Einer davon dringt sogar über die Küstenlinie hinaus und ragt elf bis zwölf Kilometer weit in den McMurdo Sound hinein. Diese Eiszunge ist etwa zehn Meter dick und schwimmt im Wasser der Bucht, das im südlichen Winter zufriert. Im Sommer branden Wellen gegen den Zungenrand und fressen tiefe Kerben in das Eis. Dies ergibt zusammen mit dem Fließen des Gletschers, der um 160 Meter pro Jahr vorrückt, das kuriose Sägezahnrelief. Die Aufnahme der Sonde Aster auf dem Terra-Satelliten zeigt rechts unten auch die etwa drei Kilometer lange Landebahn der US-amerikanischen McMurdo-Forschungsstation.

STOFFWECHSEL

Nobelpreis für Chemie: der grüne Punkt der Zelle

Zellen kennzeichnen Proteine, die in die Recyclingtonne gehören, mit einem Molekül, das seit der Urzeit des Lebens fast unverändert seinen Dienst tut. Die Entdeckung und Aufklärung dieses zellinternen Wiederaufarbeitungssystems verhalf drei Forschern aus Israel und den USA zum diesjährigen Nobelpreis für Chemie.

Avram Hershko (links) und Aaron Ciechanover (Mitte) vom Technion in Haifa sowie Irwin Rose von der Universität von Kalifornien in Irvine erhielten den Chemie-Nobelpreis für die Entschlüsselung des zellulären Recyclingsystems.

Von Michael Groß

Signale sind lebensnotwendig – im Straßenverkehr ebenso wie in der Zelle. Damit alles in geordneten Bahnen verläuft, müssen Start- und Stoppsignale im richtigen Moment angeschaltet werden. Doch genauso wichtig ist es, sie nach Ablauf ihrer Gültigkeitsperiode wieder abzuschalten. Wenn alle Ampelanlagen auf Grün stehen bleiben, kommt es garantiert zum Verkehrschaos.

In der Zelle bedienen in der Regel Eiweißstoffe die Signalhebel. Eine zentrale Stellung hat dabei zum Beispiel das Protein p53. Wenn es nicht mehr richtig funktioniert, kann die Zelle entarten und zu wuchern beginnen: Ein Tumor entsteht. Die Synthese, Abwandlung oder Ausschüttung eines solchen Proteins wirkt im Organismus also unter Umständen als Signal mit weit reichenden Konsequenzen. Doch wie wird es wieder abgeschaltet?

Die diesjährigen Chemie-Laureaten haben einen Mechanismus entdeckt, der gezielt bestimmte Proteine aus dem Verkehr zieht – teils solche, die von Anfang an fehlerhaft waren oder beim Gebrauch beschädigt wurden, aber auch Signalproteine, deren Gültigkeit abgelaufen ist. Als Schlüsselelement fungiert dabei ein kleines, in allen höheren Lebewesen fast identisches Protein namens Ubiquitin, welches als »Etikett« die abzubauenden Proteine markiert. Die Geschichte seiner Entdeckung ist geradezu ein Lehrbuchbeispiel klassischer Enzymforschung.

Gegen den Strom schwimmen

Sie begann vor 35 Jahren, als Avram Hershko, einer der drei Preisträger, als Postdoktorand nach San Francisco ging. Er kam in ein Labor, wo alles, was weiße Kittel trug, an Mechanismen arbeitete, welche die Produktion des Enzyms Tyrosin-Aminotransferase in der Zelle anregen. Um in der Masse nicht unterzugehen, beschloss er, gegen den Strom zu schwimmen. In der Zelle werden, überlegte er sich, Enzyme ja nicht nur hergestellt, sondern auch wieder abgebaut. Ihre Menge lässt sich also auch dadurch erhöhen, dass man ihren Abbau drosselt. Daher wandte er sich diesem Prozess zu und untersuchte ihn in Zell-Extrakten.

Zu seiner Überraschung stellte er fest, dass dort die Tyrosin-Aminotransferase und andere Enzyme nur dann zerlegt werden, wenn der zelluläre Energieträger Adenosintriphosphat (ATP) vorhanden ist. Seltsam daran war, dass die Aufspaltung eines Proteins in seine Aminosäurebausteine an sich keine Energie benötigt, sondern im Gegenteil sogar Wärme freisetzt. Offenbar verknüpft die Zelle, so Hershkos Schlussfolgerung, den Abbau also mit einem anderen, für sie wichtigen Vorgang – ATP ist teuer! –, der nicht von selbst stattfinden kann. Der Verdacht lag nahe, dass es ein bisher unbekannter Auswahlmechanismus sein könnte.

Nach seiner Rückkehr ans Technion in Haifa (Israel) machte sich Hershko daran, den merkwürdigen Energie verbrauchenden Abbauprozess zu analysie-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

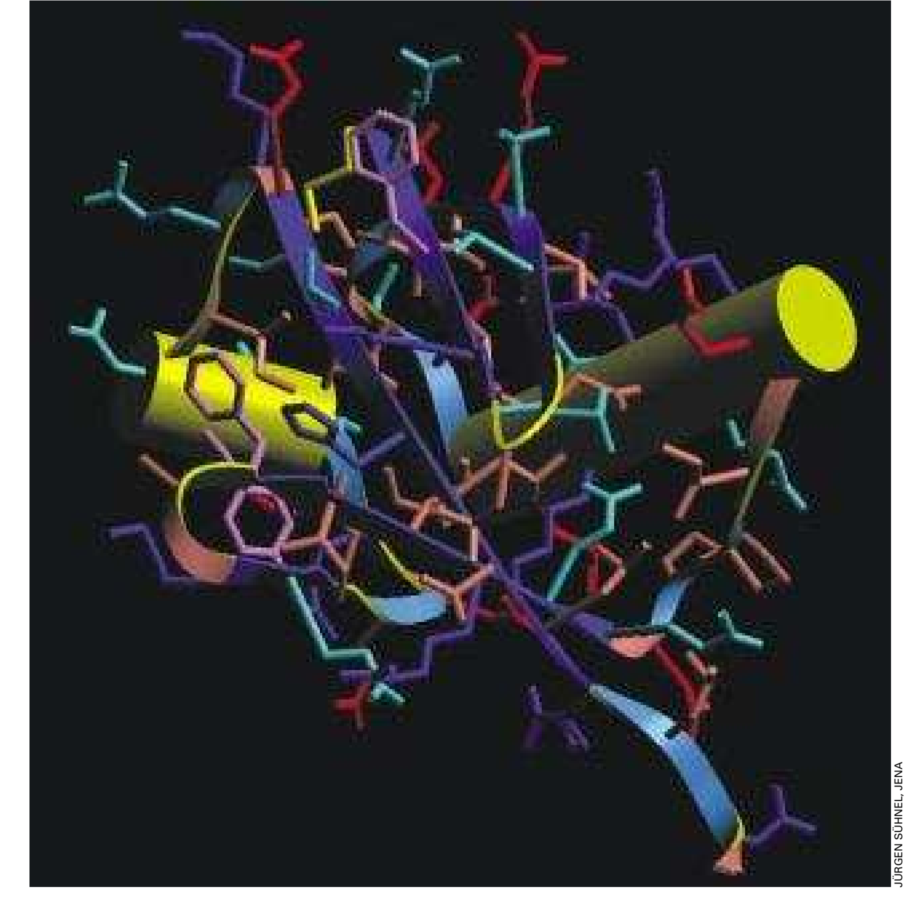
Die drei Enzyme E1, E2 und E3 versehen Proteine, die für den Abbau bestimmt sind, mit einer Kette aus Ubiquitin-Molekülen. Zunächst lagert E1 ein Ubiquitin an, aktiviert es dabei und übergibt es an E2, das sich daraufhin an E3 heftet. Letzteres tritt in Varianten mit verschiedenen Andockstellen auf, die wie Schraubenschlüssel zu bestimmten Eiweißstoffen passen. Wenn es ein passendes Protein gefunden hat, knüpft es gemeinsam mit E2 das Ubiquitin daran. Dieser Ablauf wiederholt sich, bis eine Kette von Ubiquitin-Molekülen an dem Zielprotein hängt. Die Kette bindet sich an die »Recyclingtonne« – das so genannte Proteasom – und liefert das zugehörige Protein ab. Es wird dann ins Innere gefädelt und dort in kurze Fragmente zerschnitten.

ren. Dabei unterstützte ihn sein Doktorand Aaron Ciechanover, der zweite Preisträger. Wie in solchen Fällen üblich, versuchten die Forscher, jene Komponente des Zell-Extrakts zu isolieren, welche die ATP-abhängige Enzymspaltung bewirkte. Klassischerweise unterwirft man das zu untersuchende Medium dazu einem Trennverfahren und verteilt die einzelnen Fraktionen auf kleine Gefäße. Dann prüft man, ob in einem dieser Gefäße die interessierende Reaktion vielleicht verstärkt stattfindet. Wenn ja, wurde die gesuchte Komponente in dieser Fraktion angereichert. So tastet man sich voran und hat unter günstigen Umständen einige Monate (oder Jahre) später eine Reinigungsvorschrift, die zuverlässig zu einer wohldefinierten Probe der gesuchten Komponente führt.

Bei der Enzymaktivität, die Hershko und Ciechanover in den 1970er Jahren untersuchten, gestaltete sich das Prozedere allerdings komplizierter. In einem der ersten Trennungsschritte erhielten sie bereits zwei Fraktionen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, die für sich allein aber beide inaktiv waren. Demnach musste der Abbauprozess das Zusammenwirken mehrerer Bestandteile erfordern, die sich auf die zwei Produkte der Trennung verteilten.

Die eine der beiden Fraktionen – nennen wir sie Nummer 1 – erwies sich als erstaunlich hitzestabil und war einfacher zu handhaben als die andere. Ihr wandten sich die Forscher deshalb als Erstes zu. Das war ein Glücksgriff, wie sich herausstellte; denn diese Fraktion enthielt im Gegensatz zur zweiten tatsächlich nur eine Komponente des gesamten Systems. Hershko und Ciechanover konnten diesen Bestandteil isolieren und nachweisen, dass er zusammen mit der zweiten Fraktion, die sie zunächst einfach als Gebräu ungeklärter Zusammensetzung einsetzten, den energieabhängigen Abbauprozess in Gang brachte.

Es handelte sich um ein kleines Protein mit nur 76 Aminosäuren, das sich später als alter Bekannter erwies: Ubiquitin. Auf dieses Molekül waren schon mehrere Forscher in anderen Zusammenhängen gestoßen, und seinen Namen (von lateinisch *ubique,* überall) verdankt es der Tatsache, dass es so gut wie allgegenwärtig ist.


JÜRGEN SÜHNEL, JENA

Ubiquitin spielt beim Recycling der Zelle eine Schlüsselrolle. Das nur 76 Aminosäuren lange Protein enthält zwei schraubige Alpha-Helices (gelbe Zylinder) und wellblechartige Beta-Faltblätter, in denen Abschnitte der Aminosäurekette fast parallel verlaufen (violette Bänder).

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Zwischenträger und Kuppler

Mit reinem Ubiquitin und der Fraktion 2 machte Hershko sich dann an die Aufklärung der genauen Rolle dieses Moleküls beim Abbau von Proteinen. Dabei arbeitete er mit dem dritten Preisträger – Irwin Rose – zusammen, in dessen Labor am Fox Chase Cancer Center in Philadelphia er ab 1978 mehrere Freisemester verbrachte. Aus den über ein Jahrzehnt währenden Forschungsarbeiten schälte sich schließlich ein kompliziertes Bild heraus, das sich hier nur in den Grundzügen darstellen lässt (Kasten links).

Im ersten Schritt aktiviert ein Enzym namens E1 das freie Ubiquitin, indem es sich unter Verbrauch von ATP über eine Schwefelbrücke daran heftet. Dann reicht es das Protein an einen Zwischenträger, E2, weiter, der es auf dieselbe Weise packt und dem »Kuppler« E3 zuführt. Der hat die spezielle Fähigkeit, das abzubauende Protein zu erkennen und gezielt zu ergreifen. Er übergibt es dem Zwischenträger, der das Ubiquitin daran befestigt.

Solange das Etikett nur aus einem Molekül besteht, bedeutet es noch kein Todesurteil – selbst wenn es an mehreren Stellen angeheftet ist. Bei Histonen, um die sich der DNA-Faden im Zellkern schlingt, dient eine solche Markierung zum Beispiel lediglich zur Regulierung ihrer Aktivität. Bei einem abzubauenden Eiweißstoff hingegen werden an das bereits gebundene Ubiquitin weitere Exemplare angehängt, bis sie einen regelrechten Schwanz bilden (Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S. 70).

Erst dieser versieht das Protein gleichsam mit einem grünen Punkt, der besagt: Ab damit in die Recyclingtonne! In der Zelle heißt sie Proteasom und akzeptiert ▷

▷ nur Proteine, die eine Ubiquitinkette vorweisen können (Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 54). Diese wird am Eingang zur Tonne zunächst abgespalten und freigesetzt. Die Ubiquitinmoleküle können in den Kreislauf zurückkehren, sobald eine Isopeptidase sie aus der Verkettung befreit hat.

Nach dem Entfernen des Etiketts wird der verknäulte Aminosäurefaden des todgeweihten Proteins aufgedröselt, ins Innere der Tonne geschleust und dort in Stücke geschnitten. Auch dieser Schritt verbraucht ATP. Die Schnipsel werden schließlich entweder weiter in die einzelnen Aminosäuren zerlegt, die zum Aufbau neuer Proteine dienen können, oder anderen Zwecken zugeführt – etwa an der Zelloberfläche ausgehängt, damit die Patrouillen der Immunpolizei kontrollieren können, ob vielleicht körperfremde Eiweißstoffe in der Zelle vorkommen.

Uraltes Erbe der Evolution

Das ganze System wirkt so kompliziert, dass man geneigt ist, es für eine späte Errungenschaft der Evolution zu halten. Tatsächlich aber gehört es zur Grundausstattung im gesamten Urreich der Eukaryoten – also bei Tieren, Pflanzen, Hefen, kurz: allem, was über einen Zellkern verfügt – und hat sich seit der Frühzeit des Lebens so getreu erhalten wie sonst kaum ein Mechanismus. Vergleicht man das Ubiquitin des Menschen mit dem anderer Tierarten, findet man meist keinen Unterschied. Selbst das Exemplar der Bierhefe weicht nur in drei Positionen von unserem ab.

Eine derart strikte Bewahrung deutet – ebenso wie der Nobelpreis – darauf hin, dass die Geschichte wichtig sein muss. Tatsächlich können Störungen des Ubiquitinsystems zu einer Reihe schwerer Krankheiten führen, darunter Krebs. Dass das allgegenwärtige Molekül für Mensch und Tier so unverzichtbar ist und Abweichungen in seiner Zusammensetzung nicht geduldet werden, hat letztendlich denselben Grund wie die Tumorgefahr bei Mutationen im p53. Wir Eukaryoten sind in hohem Maße von unseren zellulären Signalen abhängig: Wenn die Ampelanlagen ausfallen, gibt es Verkehrschaos in der Zelle – mit verheerenden Folgen. ◁

Michael Groß ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

QUANTENDYNAMIK

Nobelpreis für Physik: asymptotische Freiheit

Der diesjährige Physik-Nobelpreis geht an drei Wissenschaftler, deren Arbeiten die Grundlage für die Quantenchromodynamik geschaffen haben – die Theorie für jene »starke Kraft«, welche die fundamentalen Bausteine der Materie zusammenhält.

Von Uwe Reichert

Wohl im Leben eines jeden Studenten gibt es ein Ereignis, das die Weichen für seinen späteren Werdegang stellt. Für Frank Wilczek, einen der drei diesjährigen Preisträger, war es die Begegnung mit David Gross, dem zweiten der Physik-Laureaten. Wilczek hatte 1972 an der Stanford-Universität in Kalifornien die Master-Prüfung in Mathematik abgelegt und suchte nun ein Thema, an dem er weiterarbeiten konnte. »Ich brauchte eine Aufgabenstellung, die mich packte und die nach einer Lösung verlangte«, erinnerte er sich später in einer seiner Publikationen.

Wilczek fand diese Aufgabe nicht in der Mathematik, sondern in einem angewandten Fachgebiet. »In der Physik«, so dachte er, »musst du nicht selbst nach offenen Fragen suchen – das erledigt die Natur für dich.« Also belegte der damals 21-Jährige eine Vorlesung über relativistische Quantenfeldtheorie. Dozent war der nur zehn Jahre ältere David Gross. »Innerhalb von fünf Minuten fielen mir zwei Dinge auf«, schrieb Wilczek: »Dieser Gross war ein kluger Kopf, und er zeigte leidenschaftliches Interesse an dem Stoff, den er vortrug. Das war genau das, was ich suchte.«

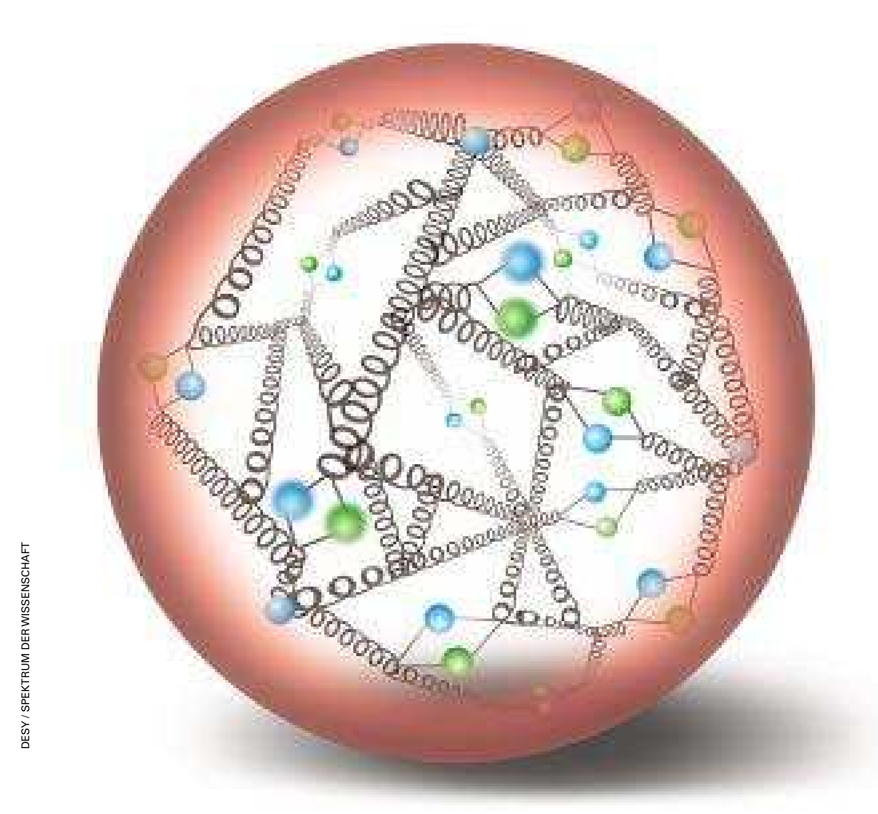
▲ **Für ihre Erklärung der starken Kraft wurden David Gross (links) von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara, Frank Wilczek (Mitte) vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und David Politzer vom California Institute of Technology in Pasadena mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet.**

Gespür für die richtige Theorie

In zahlreichen Gesprächen mit Gross lernte Wilczek zunächst etwas sehr Wichtiges: Während Lehrbücher nur erfolgreiche Ideen behandeln und dadurch den Eindruck vermitteln, wissenschaftlicher Fortschritt verlaufe nach einem geordneten, logischen Muster, sieht die Realität anders aus. Der junge Student begriff, dass man sich als Forscher wie in einem Labyrinth bewegt, stets auf der Suche nach dem richtigen Weg, und dass es einer gehörigen Portion Erfahrung und Intuition bedarf, zwischen all den verwirrenden Sackgassen die Erfolg versprechende Richtung auszumachen. Gross hatte bereits einen sechsten Sinn dafür entwickelt, und sein Schüler erwarb bald das gleiche Gespür.

So dauerte es nicht lange, bis das Interesse der beiden auf ein rätselhaftes Phänomen gelenkt wurde. Ende der 1960er Jahre war in der Nähe ihrer Universität – am Stanford Linear Accelerator Center (Slac) – ein drei Kilometer langer Linearbeschleuniger in Betrieb gegangen. Diese Riesenmaschine erzeugte hochenergetische Elektronen, die sich als ideale Sonden erwiesen, um ins Innere von Protonen und Neutronen einzudringen und die Struktur dieser Kernbausteine zu erforschen. Ein bewegtes Elektron verhält sich nämlich wie eine Welle, deren Wellenlänge von seiner Geschwindigkeit abhängt.

Ein langsames Elektron hat eine relativ große Wellenlänge; es stößt deshalb mit dem Proton als Ganzem zusammen und wird abgelenkt – ähnlich einer Murmel, die auf eine Billardkugel trifft. Erhöht man aber die Energie des Elektrons, wird seine Wellenlänge schließlich kleiner als der Durchmesser des Protons, sodass es in dieses eindringt und Informationen ▷



DESY / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ über sein Innenleben liefert (Spektrum der Wissenschaft, 3/2001, S. 62). Schon nach kurzem Experimentbetrieb mehrten sich die Indizien, dass das Proton eine »körnige« Struktur hat und aus noch kleineren Bestandteilen aufgebaut ist, die Murray Gell-Mann und Georg Zweig schon einige Jahre vorher postuliert und Quarks genannt hatten.

An einem Teilchen ohne innere Struktur sollten die auftreffenden Elektronen mit fast der gleichen Energie abprallen, mit der sie angekommen waren. Bestünde das Teilchen jedoch aus kleineren Einheiten wie den Quarks, würden die hochenergetischen Elektronen direkt mit diesen zusammenstoßen. Wenn sich die Quarks zudem in stetiger Bewegung befänden, kollidierten manche Elektronen mit schnell bewegten, andere hingegen mit fast ruhenden. Demnach sollten sie mit unterschiedlicher Energie abprallen. Genau das zeigten die Experimente am Slac: Die Energien der gestreuten Elektronen variierten erheblich. Aus dem Streumuster schlossen die Forscher auf das Vorhandensein von drei Quarks.

Die Kräfte, die zwischen ihnen wirkten, verhielten sich allerdings sehr merkwürdig: Sie schienen umso kleiner zu werden, je näher sich die Quarks kamen. Das bereitete den Physikern einiges Kopfzerbrechen, schien es doch fundamentale Prinzipien der Physik zu verletzen. Die Gravitation nimmt mit wachsender Entfernung ab, die elektromagnetische Wechselwirkung ebenfalls. Warum sollte ausgerechnet die starke Wechselwirkung – wie man die Kräfte zwischen den Quarks nennt – das umgekehrte Verhalten zeigen?

▲ Nach den Erkenntnissen der Physik-Nobelpreisträger werden die Quarks im Inneren des Protons durch eine Kraft zusammengehalten, die wie eine Sprungfeder wirkt und sie umso stärker zueinander zieht, je weiter sie sich voneinander entfernt haben. Vermittler dieser Kraft sind die Gluonen. Diese Austauschteilchen können auch untereinander wechselwirken und dabei kurzzeitig virtuelle Quark-Antiquark-Paare erzeugen.

Gross und Wilczek vermuteten in diesem merkwürdigen Abstandsverhalten den Schlüssel zum Verständnis der starken Wechselwirkung. Damals gab es bereits einige Theorien, die das Verhalten von eng benachbarten subatomaren Teilchen zu beschreiben suchten – doch sie alle ergaben das gewohnte Abstandsgesetz: Die Kraft zwischen Teilchen wurde umso größer, je dichter man sie zusammenbrachte.

Allerdings war eine bestimmte Klasse von Theorien noch unerforscht: die so genannten nicht-abelschen Eichtheorien. An diese hatten sich die theoretischen ▷

NACHGEHAKT

Raumschiff Enterprise startklar, alles einsteigen!

Als die privat finanzierte Weltraumrakete Space Ship One im Oktober zum zweiten Mal innerhalb einer Woche bis an den Rand der Erdatmosphäre flog und damit den Ansari-X-Preis gewann, war unter den geladenen Gästen auch ein gewisser Sir Richard Branson, berühmt-berüchtigt als Abenteurer und Unternehmer. Er will auf der Grundlage des Space Ship One eine Rakete für kommerzielle Raumflüge entwickeln lassen.

Getreu seinem Motto »Nur keine falsche Bescheidenheit!« verkündete er, dass sein neues Unternehmen, Virgin Galactic (sic!), mit einem Raumschiff namens Enterprise (kein Witz!) ab 2007 im regelmäßigen Flugverkehr zahlende Passagiere auf eine Höhe von etwa hundert Kilometern schießen will. Das ist zwar etwas weiter als der diesjährige Rekordflug, aber trotzdem bei weitem nicht hoch genug, um in eine stabile Erdumlaufbahn einzutreten. Gemessen an den 384 000 Kilometern zum Mond, legt die Enterprise etwa dieselbe Strecke zurück wie die Hamburger Ameisen, die in dem bekannten Ringelnatz-Gedicht nach Australien reisen wollten.

Sir Richard hat für die ersten fünf Betriebsjahre dreitausend Passagiere eingeplant. Doch bevor Sie jetzt aufspringen und ihm die 160 000 Euro für eine Weltraumfahrkarte hinblättern, sollten Sie vielleicht besser die Vorgeschichte der jungfräulichen Unternehmensgruppe kennen. Schuld an deren raketengleichem Aufstieg ist wohl letztlich der jüngst verstorbene Radio-Discjockey John Peel. Der war 1973 so dreist, in seiner Sendung die Langspielplatte eines völlig unbekannten Künstlers namens Mike Oldfield in voller Länge abzuspielen. Da die Untertanen Ihrer Majestät stets auf Peels Empfehlungen hörten, wurde das Album – und die Single »Moonlight Shadow« – ein Sensationserfolg. Die winzige Plattenfirma, die Oldfield unter Vertrag hatte, schwamm plötzlich im Geld. Mitbegründer Richard Branson hatte das Label »Virgin Records« genannt, weil er seine Unerfahrenheit als Geschäftsvorteil betrachtete.

Mit demselben Geschäftsvorteil – und beträchtlicher Liquidität aus dem erfolgreichen Musikgeschäft – stürzte sich der Jungunternehmer nun in andere Wirtschaftsbereiche. Er gründete eine Fluglinie, braute Cola, verkaufte Handys und versuchte sich als Retter der kaputtgesparten britischen Eisenbahnen. Als er jetzt seine ehrgeizigen Weltraumpläne verkündete, machten seine Eisenbahnzüge gerade Negativschlagzeilen – wegen technischer Pannen an den neu eingeführten Pendolinos. Aber dafür hat Branson es stets verstanden, mit erfolgreichen oder glücklosen Abenteuern Sympathiepunkte zu gewinnen – sei es, dass er mit einer Ballon-Weltumrundung scheiterte oder einen Geschwindigkeitsrekord für die amphibische Überquerung des Ärmelkanals aufstellte. Und so kam auch die Queen nicht daran vorbei, ihn für seine Verdienste um die britische Wirtschaft zum Ritter zu schlagen.

SCALED COMPOSITES LLC

Bleiben Sie dabei, sich von diesem begnadeten Hasardeur in den Weltraum schießen zu lassen? Sie sollten sich jedenfalls schnell entscheiden. Innerhalb von vier Wochen nach Bekanntgabe des Projekts haben sich nämlich schon 7000 Unerschrockene vormerken lassen, darunter der 73-jährige William Shatner, der seinerzeit als »Captain Kirk« die andere Enterprise durchs Weltall steuerte.

Ob er seine Getreuen von einst mit an Bord bringt? Zumindest muss er sich nicht um die Kosten kümmern, notfalls nimmt er eine Kamera mit und spielt den Flugpreis über TV-Lizenzen wieder ein. Vor allem der von Identitätskrisen geschüttelte Leonard Nimoy – dem Buchbekenntnis »I am not Spock« folgte kürzlich der Widerruf »I am Spock« – dürfte die Quoten hochtreiben.

Verglichen mit den 20 Millionen Dollar, die Denis Tito als Privatmann für den Trip zur Internationalen Raumstation zahlte, sind 160 000 Euro ja wirklich ein Schnäppchen. Allerdings dauert die ganze »Weltraum«-Reise auch nur drei Stunden, und es bleiben gerade einmal fünf Minuten, den Ausblick von ganz oben zu genießen. Den wirklich großen Überblick verschafft dieser Aussichtspunkt ohnehin nicht, auch wenn sich von dort immerhin schon die Krümmung der Erde erkennen lässt. Zwar beginnt am Rand der Atmosphäre offiziell das Weltall, als normaler Erdenbürger stellt man sich darunter aber eigentlich etwas anderes vor.

Tatsächlich erinnert der dreistündige Hüpfer weniger an Raumfahrt als an inverses Bungee-Jumping. Einen Captain Kirk, an serienmäßige Forschungsreisen durch unendliche Weiten gewöhnt, würde er sicher maßlos enttäuschen. Wer noch genügend Lebenszeit vor sich hat, sollte daher lieber warten, bis die Raketen irgendwann tatsächlich Orbithöhe – also mindestens dreihundert Kilometer – erreichen. Sir Richard lässt bestimmt schon Pläne zeichnen für ein Virgin-Hotel in der Umlaufbahn, unter dem bescheidenen Namen »Hotel am Rande des Universums«.

Michael Groß



www.proseandpassion.com



SCALED COMPOSITES LLC

Diesen Blick sollen Normalsterbliche ab 2007 für 160 000 Euro genießen können.

▷ Physiker noch nicht so recht herangewagt – nicht wegen des abschreckenden Namens, sondern weil sie mathematisch schwer zu handhaben waren und zudem jede Menge Ausdrücke enthielten, denen keine physikalische Bedeutung beigemessen werden konnte. Beispielsweise tauchten darin Teilchen auf, die mit negativer Wahrscheinlichkeit entstehen sollten. Die Wahrscheinlichkeit für die Existenz eines Partikels muss jedoch zwischen 1 (Teilchen existiert sicher) und 0 (Teilchen existiert nicht) liegen; negative Werte ergeben keinen Sinn.

Der Widerspenstigen Zähmung

Einer der ersten Physiker, der solch unsinnig erscheinenden Theorien brauchbare Vorhersagen entlockt hatte, war der Niederländer Gerardus 't Hooft. Auf Anregung seines Doktorvaters Martinus Veltman entwickelte er 1971 an der Universität Utrecht ein Instrumentarium, mit dem sich unliebsame Ausdrücke in den Rechnungen zum Verschwinden bringen lassen. Mit diesem Kniff – unter Fachleuten als »Renormierung« bekannt – gelang es schließlich, die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung, welche die elektromagnetische und schwache Kraft zwischen Elementarteilchen unter einen Hut brachte, auf ein solides mathematisches Fundament zu stellen. Für diese Leistungen erhielten 't Hooft und Veltman 1999 den Nobelpreis für Physik (Spektrum der Wissenschaft, 12/1999, S. 18).

Auf dem von den beiden Niederländern entwickelten Handwerkszeug baute Wilczek nun in seiner Doktorarbeit auf. Gemeinsam mit Gross gelang es ihm, nicht-abelsche Eichtheorien so umzuformen, dass sie das in den Slac-Experimenten beobachtete Verhalten der starken Wechselwirkung korrekt beschrieben: Die Kraft zwischen den Quarks geht mit abnehmender Distanz gegen null. Diese Eigenschaft nennen die Physiker asymptotische Freiheit. Demnach verhalten sich die Quarks in Protonen und Neutronen bei geringen Abständen (was hohen Energien entspricht) wie freie Teilchen. Entfernen sie sich etwas voneinander, so beginnen sie sich anzuziehen – als seien sie durch ein unsichtbares Gummiband verbunden, das ein zu starkes Auseinanderdriften verhindert und das erschlafft, wenn die Quarks eng beisammen sind.

Gross und Wilczek waren allerdings nicht die einzigen, die das Potenzial nicht-abelscher Eichtheorien erkannt hatten. Mehrere Kollegen versuchten ebenfalls, in dem Labyrinth aus verschiedensten Theorien die richtige herauszufischen. Ein weiterer Doktorand – H. David Politzer, der nun ebenfalls den Physik-Nobelpreis erhielt – hatte sich an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) derselben Theorieklasse zugewandt. Seine Berechnungen lieferten das gleiche Ergebnis wie diejenigen der beiden Fachkollegen in Stanford.

Im Juni 1973 erschienen die Artikel von Gross und Wilczek sowie von Politzer in derselben Ausgabe der renommierten Fachzeitschrift »Physical Review Letters«. Sie bedeuteten einen Durchbruch im Verständnis der Naturkräfte, den das Nobelpreiskomitee nach mehr als dreißig Jahren nun würdigt. Die von den drei Laureaten begründete Theorie – heute unter dem Namen Quantenchromodynamik bekannt – bildet ein wesentliches Element des Standardmodells der Teilchenphysik, das alle Grundbausteine der Materie und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte in einheitlicher Weise beschreibt.

In seiner ausführlichen Begründung erwähnt das Nobelpreiskomitee auch die bedeutenden Vorarbeiten anderer Wissenschaftler. Schon 1970 hatte der Hamburger Physiker Kurt Symanzik herausgefunden, wie das Ergebnis lauten müsse, doch verhedderte er sich in den Wirrungen der Theorie. Auch 't Hooft hatte 1972 auf einer Konferenz in Marseille das richtige Ergebnis skizziert – aber er versäumte es, eine Publikation darüber vorzulegen.

Damit bekommen Gross, Wilczek und Politzer den Preis auch, weil sie als Erste kundtaten, im Labyrinth den richtigen Weg gefunden zu haben. Wilczek drückte es einmal so aus: »Die asymptotische Freiheit wartete geradezu darauf, entdeckt zu werden, und wenn wir es nicht getan hätten, wäre der Fortschritt der Physik kaum verzögert worden. Ich möchte nicht zu bescheiden sein – die beiden Davids und ich haben sehr trickreiche Dinge getan und hart gearbeitet. Aber ich hatte stets den Eindruck, dass die Entdeckung in gewisser Weise umgekehrt verlief – und ich bin ewig dankbar dafür, dass die asymptotische Freiheit mich entdeckte.« ◁

Uwe Reichert ist promovierter Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

WAHRNEHMUNG

Nobelpreis für Medizin: Riechen als Rechenexempel

Für grundlegende Arbeiten zur Aufklärung des Geruchssinns erhielten Linda Buck und Richard Axel den Nobelpreis für Medizin. Wie sie herausfanden, setzt das Gehirn auf Kombinatorik, um die enorme Vielfalt an Duftreizen zu unterscheiden.

Linda Buck vom Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle (Washington) und Richard Axel von der Columbia-Universität in New York teilen sich den Medizin-Nobelpreis für ihre Arbeiten zur Aufklärung des Geruchssinns.

Von Bernhard Epping

Die Sensation war vorsichtig formuliert: Es könnte sich um die lang gesuchten Riechrezeptoren handeln, erklärten Richard Axel und Linda Buck 1991 in der Zeitschrift »Cell«. Er war Biochemiker an der Columbia-Universität in New York und sie leitende Mitarbeiterin in seinem Labor. Trotz der vornehmen Zurückhaltung erkannte die Fachwelt in der Publikation sofort einen Meilenstein: Endlich war es gelungen, auch beim letzten Sinnessystem, das sich der forscherischen Neugier noch widersetzt hatte, die molekularen Hintergründe aufzudecken. Gut zehn Jahre später honorierten die Juroren in Stockholm dies nun mit dem Nobelpreis für Medizin oder Physiologie.

Auf der Fährte waren viele gewesen. Doch das schmälere nicht die Leistung der jetzt Geehrten, erklärt einer der damaligen Mitkonkurrenten, der Sinnesphysiologe Heinz Breer von der Universität Hohenheim: »Beide sind herausragende Forscher.«

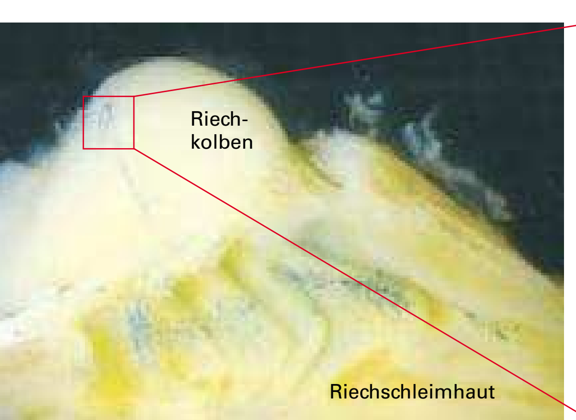
Riechen, nur so viel war vorher klar, findet bei Wirbeltieren an einem Stück Schleimhaut in der Nase statt. Dieses gelbliche Epithel ganz oben in der Nasenhöhle bringt es beim Menschen auf etwa fünf Quadratzentimeter Fläche. Auf engstem Raum drängen sich dort rund zehn Millionen spezieller Nervenzellen – fünf Millionen sind es bei der Maus und weit über 100 Millionen beim Dackel. An ihrem einen Ende ragt ein Büschel haarartiger Cilien in die Nasenhöhle, am anderen zieht ein Axon zu den Mitralzellen im dicht darüber gelegenen Riechkolben, einer Art Vorposten des Gehirns. Von dort gelangt die Information zum limbischen System und zum Kortex.

Antennen für Düfte

Ziemlich sicher war man sich Ende der 1980er Jahre auch, dass die Duftstoffe auf den Zellen im Riechepithel in Kontakt mit speziellen »Antennen« treten. Vorarbeiten von Randall R. Reed in Baltimore, Doron Lancet in Rehovot und Breer hatten zudem gezeigt, um welchen Typ von Signalempfängern es sich handelte: so genannte G-Protein-gekoppelte Rezeptoren. Diese bilden ein universelles Empfangssystem für Signale, die an der Außenseite der Zelle eintreffen und nach innen geleitet werden sollen. Schon die Plattwürmer arbeiteten vor 800 Millionen Jahren damit. Sehr viele Hormone, Neurotransmitter und Botenstoffe des Immunsystems benutzen es – und Hunderte von Medikamenten wirken darauf ein. Auch der Sehvorgang an den Netzhautzellen und der Geschmack von süß und bitter auf der Zunge laufen über Rezeptoren ab, die an G-Proteine als Signalwandler gekoppelt sind.

Ein sehr »cleverer Dreh« von Buck, wie Axel heute noch lobt, führte in New York zum Erfolg. Statt nach den Rezeptoren selbst fahndeten die Forscher nach den Genen dafür. Und das mussten ihrer Meinung nach solche sein, die ausschließlich im Riechepithel aktiv werden. Zum Glück hatte Kary Mullis 1985 bereits die Polymerasekettenreaktion entwickelt, mit der sich Gene aus Proben fischen lassen, von denen nur kurze Abschnitte bekannt sind. Auf diese Weise gelang es Buck und Axel, bei der Ratte 18 Riechrezeptoren aufzuspüren. Dass das alle wären, glaubten sie allerdings nicht. Sie schätzten die gesamte Genfamilie auf einige hundert Mitglieder.

Prinzip Nummer eins des Geruchssinns war damit aufgedeckt: Der Unmenge an Duftstoffen in der Natur – keiner weiß, wie viele es sind, die Lehrbuchzahl von 10000, die allein der Mensch angeblich unterscheiden kann, ist fiktiv – setzen Organismen eine Fülle verschiedener Sensormoleküle entgegen. Fische haben an die hundert, Maus und Ratte über tausend. Nach neuesten Zahlen aus Bucks Arbeitsgruppe am Hutchinson-Krebsforschungszentrum in Seattle (Washington) verfügt der Mensch über genau 339 funktionstüchtige Re-





BEIDE: PETER MOOMBAERTS, ROCKEFELLER UNIVERSITY NEW YORK

Riechzellen mit einem bestimmten Rezeptortyp sind wahllos über die Riechschleimhaut verteilt, aber ihre Axone enden alle an derselben Stelle im Riechkolben. Das bewies ein Experiment mit genmanipulierten Mäusen, bei denen sich Riechzellen, die einen bestimmten Rezeptor bilden, blau färben. Man sieht, wie blaue Bahnen von verschiedenen Stellen auf der Riechschleimhaut alle zum selben Punkt im Riechkolben ziehen.

zeptorgene (neben 297 defekten Varianten). Ähnlich viele sind es auch bei Wirbellosen wie der Taufliege und dem Fadenwurm. Je nach Spezies machen sie ein bis drei Prozent des Genoms aus. Damit bilden sie die größte Genfamilie überhaupt, noch vor der für die Immunglobuline oder die T-Zellrezeptoren.

Die Komplexität des Geruchssinns schon auf unterster Ebene kontrastiert deutlich mit der Organisation anderer Sinne: Wenige Rezeptoren für Farben – beim Menschen drei – reichen beim Säugetierauge, um die Spektren der Lichtphotonen sauber zu unterscheiden. Die Nase kämpft allerdings, anders als das Auge, mit verwirrend vielfältiger Chemie statt logisch geordneter Physik.

Letztlich muss auch sie freilich vor der Unzahl der Duftstoffe kapitulieren. Für jeden einen eigenen Rezeptortyp bereitzuhalten, wäre ein Ding der Unmöglichkeit. Deshalb greift das Riechsystem auf die Kombinatorik zurück. Erst Signale von mehreren Rezeptortypen sind der Code, an dem es einen Duftstoff erkennt. Besonders eindrucksvoll demonstrierte das Team um Linda Buck, die schon 1991 ihren Mentor verlassen und als Asisstant Professor nach Harvard gegangen war, dieses Grundprinzip 1999 an isolierten Riechzellen. Sie konnte zeigen, dass jeder Duftstoff mehrere Rezeptoren aktiviert. Umgekehrt registriert auch jeder Rezeptor eine Reihe von Duftstoffen, wenngleich mit unterschiedlicher Intensität. Der einzelne Sensor fungiert damit eher wie ein Buchstabe in einem Alphabet, mit dem »Duft«-Wörter generiert werden.

Anatomie des Geruchssinns

Nach 1991 lieferten Axel und Buck unabhängig voneinander auch wichtige Daten zur räumlichen Organisation des Geruchssinns im Gehirn. Demnach stellt jedes Riechneuron nur einen einzigen der vielen Rezeptortypen her. Auf dem Riechepithel herrscht dabei das Prinzip Zufall: Zellen mit unterschiedlichen Rezeptoren liegen bunt gemischt nebeneinander. Sortiert wird hingegen auf der ersten Relaisstation – im Riechkolben. Hier enden die Axone aller Riechsinneszellen mit dem gleichen Rezeptortyp auf ein und demselben Synapsenbündel oder »Glomerulus«, von dem das Signal an bestimmte Mitralzellen weitergeleitet wird. Jeder Geruch aktiviert somit immer ein charakteristisches Muster an Nervenzellen im Riechkolben: Dort existiert quasi eine Karte der Gerüche.

In der Großhirnrinde setzt sich diese Ordnung offenbar fort. Auch im olfaktorischen Kortex scheinen Düfte über den Ort kodiert zu sein, an dem Nervenzellen aktiviert werden. So landen bei Mäusen, wie Bucks Arbeitsgruppe 2001 berichtete, die Reize von Riechsinneszellen mit ein- und demselben Rezeptor immer in der gleichen Region im Riechhirn.

Diese Verarbeitungsstrategie ist von anderen Sinnesleistungen des Gehirns vertraut. Ob Töne, Farben oder Tasteindrücke – bei allen entsteht im Gehirn eine innere Repräsentation der Außenwelt. So gibt es im somatosensorischen Kortex eine Karte für Tastreize von der Körperoberfläche, welche die räumlichen Beziehungen im Körper exakt, wenn auch in den Proportionen verzerrt widerspiegelt: den berühmten Homunculus. Da Gerüche die Außenwelt aber nicht im geometrischen Sinne abbilden, dienen die festgelegten Verarbeitungsrouten in diesem Fall nur zur Identifikation des Reizes und nicht zu seiner Lokalisierung.

Offene Fragen gibt es noch genug. So sind bisher nur für ganz wenige Rezeptoren die zugehörigen Duftstoffe identifiziert. Ein methodisches Haupthindernis ist die notorisch schwierige Kultivierung von Riechneuronen – eine Eigenschaft, die sie mit anderen Nervenzellen teilen. Was bleibt, ist das langwierige Einschleusen von Genen für die Riechrezeptoren in etablierte Zellkulturen.

Offen ist auch, warum und wie nur ein Rezeptor pro Zelle entsteht. Zwar gibt es eine Parallele beim Immunsystem. Dort generieren die Lymphozyten gleichfalls nach dem Zufallsprinzip nur jeweils einen unter Millionen unterschiedlicher Antikörper. Ursache dafür ist die Rekombination von DNA unter Verlust von genetischem Material. Bei den Riechzellen scheidet dieser Mechanismus jedoch aus, wie Axels Arbeitsgruppe zusammen mit dem Team von Rudolf Jaenisch am Whitehead-Institut für Biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts) sowie Peter Mombaerts an der Rockefeller-Universität in New York Anfang dieses Jahres zeigten. Mäuse, die aus differenzierten Riechneuronen geklont werden, bilden nämlich wieder alle Rezeptorproteine. Bei der Spezialisierung auf nur ein Genprodukt gehen also keine Sequenzen verloren. Vielmehr scheint das in einer Zelle gebildete Rezeptorpro- ▷

tein selbst aktiv alle anderen Rezeptorgene abzuschalten, wie Teams um Reed und Hitoshi Sakano von der Universität Tokio belegen.

Ein Rätsel ist schließlich noch, wie die richtige Verschaltung von Riechneuronen mit nur einigen Nervenzellgruppen im Riechkolben zu Stande kommt. Eine Rolle könnten dabei wiederum die Rezeptoren spielen. Sie kommen nämlich, wie Forscher um Axel und Breer dieses Jahr unabhängig voneinander gezeigt haben, auch in den Axonen der Zellen vor. Ohnehin hatten die Nobelpreisträger Unrecht, als sie meinten, Riechrezeptoren gäbe es nur auf dem Riechepithel. Mittlerweile sind einige auch im autonomen Nervensystem und sogar in Spermien identifiziert worden.

Hilflos bei Riechstörungen

Dass die Erkenntnisse der Grundlagenforscher neue Therapien gegen Riechstörungen liefern könnten, ist derzeit noch eine ziemlich theoretische Option. Dringend nötig wären sie. Die Zahl der Betroffenen geht allein in Deutschland in die Millionen: Tumore, Unfälle oder Entzündungen können den Riechnerv schädigen oder auch die Sinneszellen direkt in Mitleidenschaft ziehen. Mitunter bleibt der Geruchssinn nach einem banalen Schnupfen auf Dauer weg. »Warum, wissen wir letztlich nicht«, gesteht Michael Damm von der HNO-Klinik der Universität Köln. Zwar gehören die Nervenzellen im Riechepithel zu den wenigen, die sich ein Leben lang erneuern. Aber offenkundig ist auch ihre Regenerationsfähigkeit begrenzt.

Bei der Suche nach Medikamenten gegen Riechstörungen regiert der blinde Zufall. Noch am ehesten helfen Corticosteroide. Zwar wird auch ein breites Arsenal anderer Mittel eingesetzt: Vitamine, Antibiotika und Zinksulfat etwa. »Das geschieht aber meist auf rein empirischer Grundlage«, moniert Damm. »Wir brauchen dringend gesicherte Konzepte.«

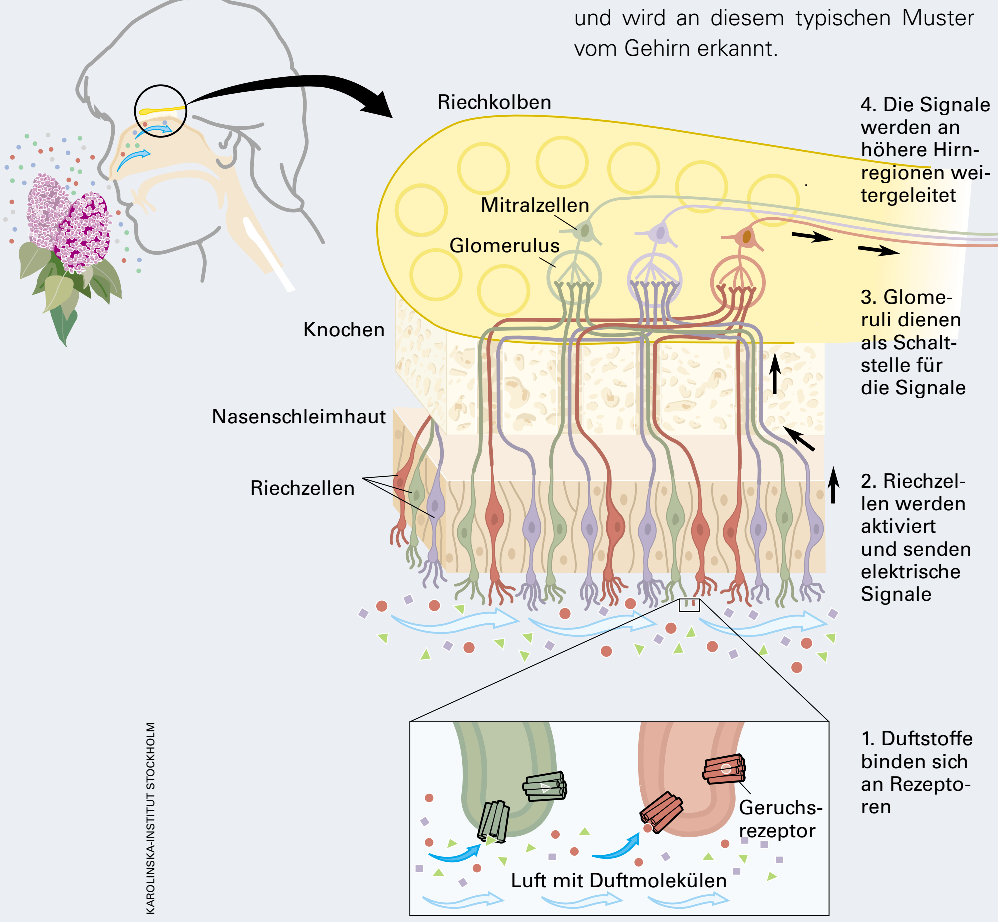
Linda Buck, Jahrgang 1947, arbeitet heute wieder in ihrem Heimatort: am Fred Hutchinson Cancer Research Center und der Universität von Washington in Seattle. Der Preis an sie solle auch eine Ermutigung für Frauen sein, in der Wissenschaft ihren Weg zu gehen, meinte sie, kurz nachdem sie von der Nachricht aus Stockholm erfahren hatte.

Richard Axel, 1946 in New York geboren, hat seine wissenschaftliche Karriere an der Columbia-Universität gemacht. In Vorträgen erklärt er gerne, dass er den Doktor der Medizin nur erhalten habe, weil er das Versprechen abgab, niemals an lebenden Patienten zu praktizieren. Und die Pathologen, bei denen er sich dann umtat, rangen ihm die Zusage ab, auch von toten Menschen die Finger zu lassen. Da blieb nicht viel übrig.

Axel gehört zu den Forschern, die Grundlagen der gentechnischen Transformation von Zellen entwickelt und den CD4-Rezeptor identifiziert haben, über den das Aidsvirus menschliche Zellen infiziert. Außerdem hat er über Mechanismen der Krebsentstehung gearbeitet. Etliche derer, die heute Rang und Namen in der Riechforschung haben, sind durch sein Labor gegangen. Konkurrenz zu ehemaligen Mitarbeitern? Nein, das würde er so nicht sagen, ganz und gar nicht, beschied er eine neugierige Reporterin. In der Wissenschaft müsse man Spaß am Forschungsprozess selbst haben, weniger am Ergebnis.

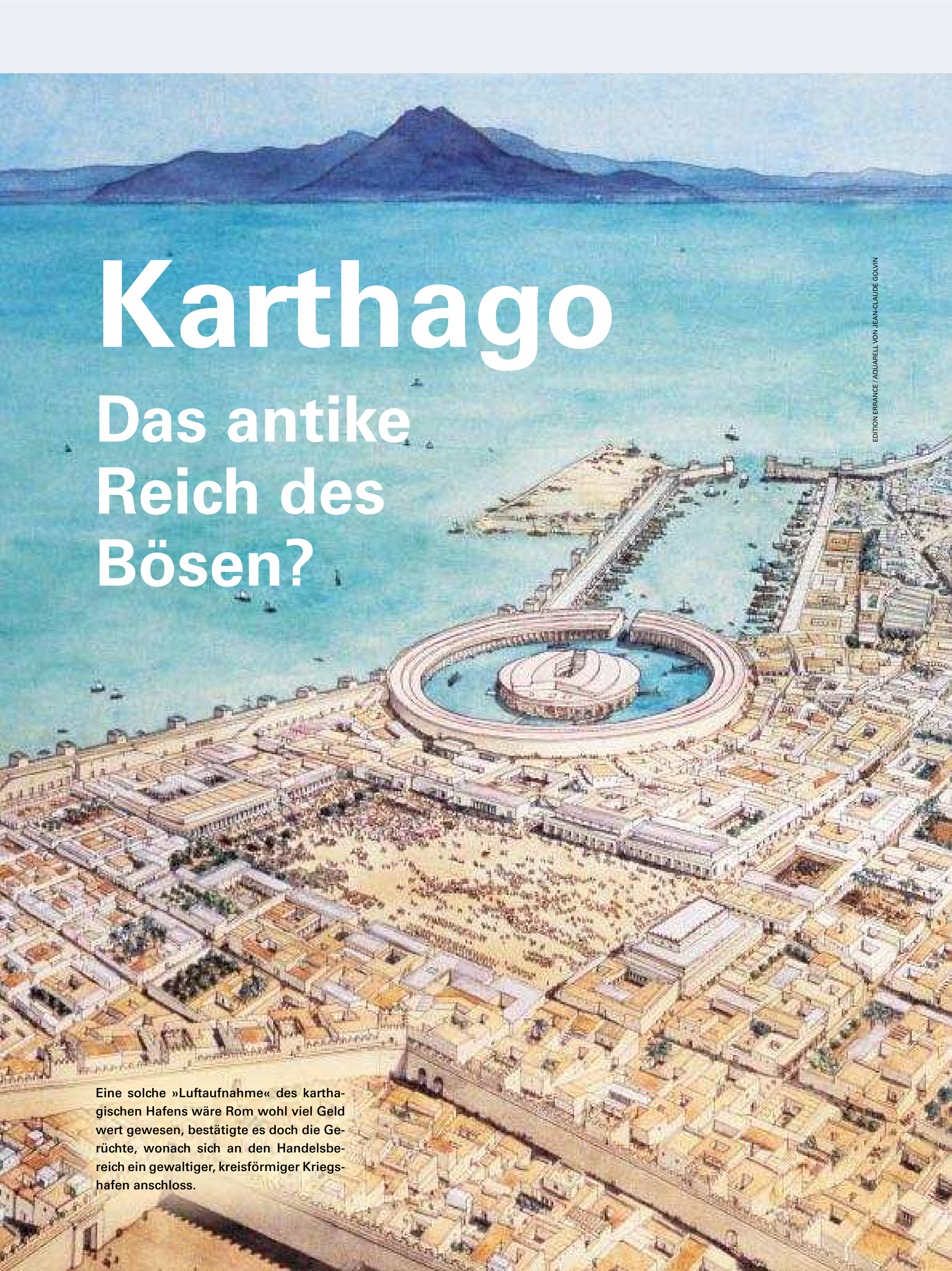
Wie wir riechen

Ein Duft besteht meist aus mehreren flüchtigen Substanzen, die in der Riechschleimhaut ganz oben in der Nase auf molekulare Rezeptoren treffen. Diese sitzen auf haarartigen Cilienbüscheln an der Spitze der Riechzellen. Jede solche Zelle verfügt über nur einen Rezeptortyp, der ausschließlich bestimmte Duftmoleküle bindet. Wenn das geschieht, sendet sie über ihr faserartiges Axon ein elektrisches Signal in den direkt darüber gelegenen Riechkolben. Alle Axone von Sinneszellen mit demselben Rezeptortyp enden dort jeweils an der gleichen Schaltstelle, einem als Glomerulus bezeichneten Synapsenbündel. Von dieser Schaltstelle gelangt das Signal dann über so genannte Mitralzellen in höhere Hirnregionen. Ein Duftmolekül aktiviert jeweils ein bestimmtes Sortiment von Rezeptortypen mehr oder weniger stark und wird an diesem typischen Muster vom Gehirn erkannt.



KAROLINSKA-INSTITUT STOCKHOLM

Bernhard Epping ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Tübingen.



Karthago

Das antike Reich des Bösen?

EDITION ERRANCE / AQUARELL VON JEAN-CLAUDE GOLVIN

Eine solche »Luftaufnahme« des karthagischen Hafens wäre Rom wohl viel Geld wert gewesen, bestätigte es doch die Gerüchte, wonach sich an den Handelsbereich ein gewaltiger, kreisförmiger Kriegshafen anschloss.

»Das große Karthago führte drei Kriege. Es war noch mächtig nach dem ersten, noch bewohnbar nach dem zweiten. Es war nicht mehr auffindbar nach dem dritten«

Bertolt Brecht: »Offener Brief an die deutschen Künstler und Schriftsteller«, 1951

Von Theodor Kissel

Hoch schlugen die Flammen und über der Stadt lag Leichengeruch. Seit sechs Tagen eroberten römische Legionäre nun schon das verhasste Karthago Straße um Straße, plünderten und töteten die Punier. Nun holten sie zum letzten Schlag aus und erstürmten den Burgberg. Dort hatten sich 900 Krieger im Tempel Ešmūns verschanzt, des Schutzgottes der Stadt.

Gegen die römische Militärmaschinerie mit ihren Sturmleitern, Rammböcken und Katapulten waren diese Kämpfer ohne Chance: Im April 146 v. Chr. steckten sie am siebten Tage der Schlacht ihren Zufluchtsort selbst in Brand, um der Schmach einer Gefangenschaft zu entgehen. Rom hatte gesiegt, tausende Einwohner und Soldaten waren gefallen oder in die Sklaverei verschleppt worden. Der siegreiche Feldherr Publius Cornelius Scipio Aemilianus, Oberkommandierender in diesem dritten und letzten Krieg gegen die Punier, soll beim Anblick der brennenden Stadt geweint haben. Das berichtete der griechische Historiker Diodor von Sizilien (1. Jahrhundert v. Chr.). Doch nicht Mitgefühl mit den Besiegten rührte den Konsul, sondern die Sorge, Rom könne eines Tages das gleiche Schicksal erleiden.

Kein Stein blieb auf dem anderen, die gesamte Stadt wurde dem Erdboden gleichgemacht. Sämtliches Schriftgut fiel der Vernichtung anheim, lediglich einige brauchbar erscheinende Werke zur Landwirtschaft wie die des Agrarexperten Mago fanden ihren Weg nach Rom – das Imperium tilgte jede Spur seines Kontrahenten. Mehr als hundert Jahre lang erinnerte nur ein Trümmerfeld an die einstige Metropole, dann ließ Kaiser Augustus auch diese Erinnerung löschen: Auf dem eingeebneten Gelände entstand die römische Siedlung Carthago Iulia Nova.

Was war der Grund für das rigorose Vorgehen der Römer? Und wer waren die Punier wirklich? Lange Zeit mussten Historiker zwischen den Zeilen römischer Texte lesen, um diesen Fragen nachzugehen. Erst 1974 begannen Wissenschaftler aus zehn Ländern unter dem Patronat der Unesco die antike Handelsmetropole auszugraben. In neun Meter Tiefe fanden die Archäologen die Relikte einer Kultur, die führend in der Metallverarbeitung gewesen war und neue Maßstäbe in der Navigation gesetzt hatte: eine Stadt der Seefahrer und Händler. Eine Ausstellung im Badischen Landesmuseum in Karlsruhe präsentiert derzeit einen Überblick über den neuesten Stand der Forschung.

Die Fürsten der Meere

Karthagos Wurzeln lagen an der Küste der Levante, also dem heutigen Libanon und Teilen Israels. Als die damaligen Supermächte Ägypten und das Reich der Hethiter an Kraft und Einfluss verloren, nutzte eine Hand voll phönizischer Stadtstaaten um 1000 v. Chr. die Gunst der Stunde zur Expansion ins westliche Mittelmeer (Punier ist die latinisierte Form des Wortes Phönizier). Auf der Suche nach neuen Märkten und Rohstoffen errichteten die »Fürsten des Meeres« (Altes Testament, Buch Ezechiel) dort ein engmaschiges Netz von Handelsstützpunkten. Im Rahmen dieser Westkolonisation gründeten Händler der alten und mächtigen phönizischen Stadt Tyros (heute: Sur) um 814 v. Chr. in der heutigen Bucht von Tunis eine Siedlung. Der griechische Geschichtsschreiber Herodot (etwa 484–430 v. Chr.) nannte seine Bewohner daher »Kinder der Tyrer«. Der Ort erhielt den Namen Qrt Hdšt, »Neue Stadt«, von den Römern Karthago genannt.

Unter den Neuankömmlingen aus dem Osten befand sich der Legende nach auch Dido, die Tochter des tyrischen Königs Mutto. Der Bruder Pygmalion hatte ihren Mann aus Habgier erschlagen, woraufhin Dido mit ihren Reichtümern nach Afrika geflohen war. Dort erhielt sie vom libyschen König Hiarbas die Erlaubnis, so viel Land zu kaufen, wie eine Stierhaut umfasste. Dido schnitt das Fell in feine Streifen und umspannte ein Gelände, auf dem sie die Burg Byrsa (griechisch für »Fell«) errichtete. Kurze Zeit später, so der römische Dichter Vergil (70–19 v. Chr.), soll dort auch der mythische Aeneas nach seiner Flucht aus dem brennenden Troja angekommen sein. Dido verliebte sich in ihn, doch seinem von den Göttern bestimmten Schicksal folgend brach der Held wieder auf und begründete das spätere Volk der Römer. Die Verschmähte beging Selbstmord. Diese poetische Fiktion nahm die spätere Feindschaft zwischen Rom und Karthago vorweg. Tatsächlich vermittelt der ausführlichste Bericht über die Gründung Karthagos, der des römischen Historikers Iustin (3. Jh. v. Chr.), eine ganz andere Version. Danach habe sich Dido der drohenden Heirat mit Hiarbas durch Selbstverbrennung entzogen, um – wie man interpretierend folgern darf – mit diesem Opfer der von ihr gegründeten Stadt Segen und Wohlergehen zu sichern.

Die reale Stadt wuchs schnell zu einer bedeutenden Macht heran. Nach neuesten archäologischen Untersuchungen erstreckte sie sich zum Zeitpunkt ihrer größten Ausdehnung (3./2. Jh. v. Chr.) auf einer Fläche von über 50 Hek- ▷

Eine dreifache Mauer schützte Karthago mit seiner Vorstadt (Megara) und dem Burgberg (Byrsa) vor Angriffen von der Landseite.



▷ tar. Insgesamt 700 000 Menschen sollen dem griechischen Geografen Strabon (64 v. – 19 n. Chr.) zufolge dort gelebt haben. Karthago lag strategisch günstig auf einer in den Golf von Tunis hineinragenden Landzunge, die durch einen schmalen Isthmus mit dem Festland verbunden war. Riesige Befestigungsmauern umgaben die Stadt, sowohl an den Seeseiten als auch an der Landverbindung (siehe Karte vorige Seite).

Dort schützten zusätzlich drei Mauergürtel von 15 Meter Höhe die Stadt. Alle 60 Meter reckte sich ein vierstöckiger Turm in die Höhe, wusste überdies der griechische Historiker Appian (geb. um 100 n. Chr.) zu berichten. Jede Mauer gliederte sich in zwei Stockwerke: Im unteren lagen Ställe für 300 Elefanten mitsamt den Lagerräumen für die Futtervorräte, darüber dann die Ställe für insgesamt 4000 Pferde sowie Magazine für Heu und Gerste. Ferner befanden sich in den Mauern Unterkünfte für 20 000 Fußsoldaten und 4000 Reiter.

Die geheime Flotte

Auf den in der zeitgenössischen Literatur oft beschworenen »gewaltigen Mauern« (ingentia moenia) stand ein Großteil der insgesamt 7000 Katapulte, die Karthago 146 v. Chr. den Römern ausliefern musste. Außerdem patrouillierten dort Wachsoldaten. Die Archäologen fanden gewaltige, abgerundete Zinnen, die Schutz vor feindlichen Bogenschützen boten.

Derart gesichert lag im Innern der Wehranlage der Burgberg Byrsa, die weiträumige Vorstadt Megara und die Unterstadt, wo im 2. Jahrhundert v. Chr. der Kothon gebaut worden war, die Machtbasis des punischen Imperiums (siehe Rekonstruktion Seite 26). Dieser Doppelhafen war eine meisterhafte Ingenieurleistung: Vom Meer aus gelangten Schiffe durch eine etwa zwanzig Meter breite Einfahrt, die durch eine eiserne Kette zu schließen war, zunächst in den lang gestreckten Handelshafen. Dahinter, von hohen Mauern abgeschirmt, lag der kreisförmige Kriegshafen, die Flottenbasis der punischen Armada und Karthagos bestgehütetes Geheimnis. Griechische und römische Geschichtsschreiber wussten über ihn manch Wundersames zu berichten. Sie behaupteten, der Kothon könne binnen kürzester Zeit ganze Flotten ausspeien und wieder verschwinden lassen. Nach Appian lagen in seinen Schiffshäusern bis zu 220 Penteren vor Anker, Großkampfschiffe mit fünf Ruderreihen, die von Rampen aus in Rekordzeit zu Wasser gelassen werden konnten. Bei Grabungen auf der so genannten Admiralitätsinsel im Zentrum des Kriegshafens fand man Spuren von Trockendocks und dreißig Meter langen Rampen, auf denen die Karthager einst ihre Schiffe reparierten.

Auf diesen Galeeren, ihren trainierten Ruderern und den nautischen Fähigkeiten ihrer Kapitäne gründete Karthagos beherrschende Stellung im Mittelmeer. Zeitgenossen rühmten Geschwindigkeit und Manövrierfähigkeit dieser Kriegsschiffe. Damit stiessen die wagemutigen Seefahrer in unbekannte Gewässer vor. Sehr wahrscheinlich erreichten sie Britannien und die Küste des heutigen Kamerun. Dorthin gelangte im 5. Jahrhundert v. Chr. ihr Admiral Hanno, der mit einer Flotte von sechzig Schiffen die westafrikanische Küste um-



BADISCHES LANDESMUSEUM KARLSRUHE

◀ Die Farbe Blau stand im Ruf, Widrigkeiten abzuwehren. Diese Form der Glasamulette gehörte zu den Exportschlagern der Punierstadt.



EMDE-GRAFIK NACH: RANGER-DESIGN / JÜRGEN KAISER, UNIVERSITÄT KARLSRUHE

▼ Von der Levanteküste aus gründeten die Phönizier ihre Städte und errichteten ein Handelsimperium.

segelte. Sein Reisebericht, in einer griechischen Abschrift aus dem 3. Jahrhundert v. Chr. ist das einzig erhaltene Schriftstück dieser großen Kultur.

Um 700 v. Chr. begannen sich die phönizischen Niederlassungen von der jeweiligen Mutterstadt zu emanzipieren. Allen voran Karthago, wo ein merkantiler Adel anstelle der bislang regierenden tyrenischen Beamten die Herrschaft übernahm. Aristokratisch-oligarchische Verfassungsstrukturen bildeten sich heraus, ähnlich wie in Rom. An der Spitze des Staates standen nun zwei von der Volksversammlung auf Jahresfrist gewählte Oberbeamte (Sufeten), die die karthagischen Belange nach außen hin vertraten. Wichtiger für die Gestaltung der Politik war der aus dreihundert Mitgliedern der herrschenden Klasse bestehende Rat oder Senat, in dem wiederum ein Rat der Dreißig den Vorsitz führte. Daneben gab es den Staatsgerichtshof der Hundertvier, der über die Einhaltung der Verfassung wachte und vor dem die Beamten Rechenschaft ablegen mussten.

Das souveräne Karthago gründete nun selbst Kolonien, im 7. Jahrhundert v. Chr. die Apoikie (griechisch: »fern von zu Hause«) Tharros an der Westküste Sardiniens und Ebusos auf Ibiza. Beide Pflanzstädte gaben die Stoßrichtung weiterer Niederlassungen vor: In Spanien lockten reiche Gold-, Silber- und Eisenvorkommen. Die »Kinder der Tyrer« knüpften im Lauf der Zeit ein engmaschiges Netz küstennaher Handelsniederlassungen, das den gesamten westlichen Mittelmeerraum überzog – sie waren die ersten Global Player der Weltgeschichte. Ihr Aktionsradius reichte von der Großen Syrte im heutigen Libyen bis zu den Säulen des Herakles an der Meerenge von Gibraltar, von Gades (Cadíz) am Atlantik über die Balearen, Sardinien und Sizilien bis nach Anatolien. Unterwasserarchäologen rekonstruieren die Handelsrouten anhand von Wracks und Amphoren, den Standardtransportbehältern für Wein, Öl und Getreide, die zu tausenden auf dem Meeresgrund liegen.

Angesichts der Anzahl dieser Funde mag es nicht verwundern, dass die Karthager eine florierende Handelsmetropole und ein hoch entwickeltes Wirtschaftsimperium errichteten. Als Kaufleute waren die Punier so geschickt, dass der römische Gelehrte Plinius (23–79 n. Chr.) ihnen gar die Erfindung des Handels zuschrieb. Die mit allen Wassern gewaschenen Punier haben laut Homer sogar den listenreichen Odysseus hinters Licht geführt. Überdies galten die Karthager auch als begnadete Handwerker. Produkte made in Karthago waren in der Antike heiß begehrt. Purpurstoffe, eingefärbt mit dem Farbstoff einer Meeresschnecke gehörten schon in der alten Heimat an der Levanteküste zu den Exportschlagern. Diesem begehrten Färbemittel verdanken die Phönizier auch ihren Namen: Phoinikes bedeutet im Griechischen »die roten Menschen«.

Meister der Metalle

Ebenfalls hoch im Kurs standen Elfenbeinarbeiten, wie etwa Kämme, Statuetten oder Reliefintarsien. Zudem verstanden sich die Karthager auf die Kunst der Glasherstellung. Einen hohen Ruf hatte ihre meisterhafte Verarbeitung von Metallen, ob Gold, Silber oder Eisen. Ein belgisch-tunesisches Forscherteam unter der Leitung des holländischen Archäologen Roald Docter förderte in einer riesigen Metallverarbeitungsstätte Erstaunliches zu Tage. Computertomografien der jahrtausendealten Blasebälge verrieten, dass die Einlassventile, die den Luftstrom in die Feuerstellen regulierten, einen sehr hohen Anteil an Kalk enthielten. Die Fachleute vermuten, dass bei der Eisenverarbeitung Kalk zugemischt wurde, um Verunreinigungen aus Erz zu neutralisieren. Ein derart ausgetüfteltes Verfahren zur Produktion hochwertigen Eisens wurde erst wieder im 19. Jahrhundert entwickelt.

In der jüngsten Grabungskampagne fanden Docters Mitarbeiter dann auch die Quelle des Zusatzstoffes: Muschelkalk aus den Gehäusen der Farbstoff liefernden Meeresschnecke. Wie gut die Punier ihre Wertschöpfungsketten organisierten, unterstreicht auch die Ladung eines um 1970 bei Rochelongues (nahe ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Der legendäre Zug des Feldherrn Hannibal über die Alpen brachte das karthagische Heer vor die Tore Roms – ein Albtraum, von dem sich die Tiberstadt nie ganz erholte.

Wie mahnende Finger ragen am Tophet von Karthago, einem heiligen Bezirk, hunderte steinerner Votivstelen aus der Erde, Vermächtnisse einer rätselhaften Kultur, unter denen einst die sterblichen Reste der karthagischen Kinder in Tonurnen beigesetzt wurden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Marseille) vor der Küste gefundenen Schiffswracks: Barren, Waffen und andere metallene Objekte sprechen für die systematische Verwertung von Altmetall am Ende des 7. Jahrhunderts v. Chr. in Karthago.

Wenige Jahrzehnte später wurde die Wirtschaftsmacht mit einem neuen Konkurrenten konfrontiert: Um die Mitte des 8. Jahrhunderts v. Chr. strömten Tausende von Siedlern aus den griechischen Stadtstaaten nach Westen – eine der größten Migrationsbewegungen der Antike. Ihr Motiv: Die wachsende Bevölkerung im Mutterland konnte nicht mehr ausreichend ernährt werden, neue Ressourcen waren erforderlich. Der Wettlauf um die besten Siedlungsplätze des westlichen Mittelmeers konzentrierte sich auf Sizilien – die Insel war nicht nur enorm fruchtbar, dort kreuzten sich West-Ost-Verbindungen und Handelsrouten zwischen Afrika und Europa. Anfänglich lebten karthagische und griechische Siedler friedlich miteinander, da beide Kulturen unterschiedliche Interessen verfolgten: Erstere begnügten sich meist mit einem schmalen Küstenstreifen, an dem sie zur Sicherung der Schifffahrtswege Handelsstützpunkte anlegten, während bei den griechischen Kolonisten die Erschließung landwirtschaftlicher Nutzflächen im Vordergrund stand. Doch dann, um die Mitte des 6. Jahrhunderts v. Chr., erreichten immer mehr griechische Siedler die Küsten Siziliens und beanspruchten Ackerland.



Der Stein des Anstoßes

Der Konflikt eskalierte und aus Spannungen wurde Gewalt. Pausanias (2. Jahrhundert v. Chr.), der Baedeker der Antike, berichtete von verheerenden Kriegen. An die Spitze der Gegner Karthagos stellten sich die Tyrannen von Syrakus. Ekbarbarosis, Vertreibung der Punier von der Insel, lautete ihre Parole, mit der sie vordergründig in die Rolle eines Vorkämpfers für die Sache der Griechen schlüpften. Doch die fremdenfeindliche Politik vermochte Karthagos Position auf Sizilien nicht zu erschüttern. Dies änderte sich jedoch schlagartig, als im 3. Jahrhundert v. Chr. die Militärmacht Rom auf den Plan trat, die gerade ihren Herrschaftsbereich bis zur Südspitze Italiens ausgedehnt hatte. Rom und Karthago waren sich bedrohlich nahe gekommen, nur ein schmaler Wasserstreifen, die Meerenge von Messina, trennte jetzt noch beide Mächte.

Ein lokaler Konflikt löste schließlich den 1. Punischen Krieg (264–241 v. Chr.) aus. Syrakus versuchte die Griechensiedlung Messana von der Fremdherrschaft ehemaliger kampanischer Söldner zu befreien. Diese sich selbst hochtrabend als Mamertiner, Söhne des Mars, bezeichnenden Landsknechte richteten sowohl an Karthago als auch an Rom ein Hilfegesuch. Sie gaben damit den Startschuss für das welthistorische Ringen zwischen Rom und Karthago, das die antike Welt mehr als hundert Jahre in Atem hielt. Denn beide sahen sich genötigt, Truppen zu entsenden: Die Römer befürchteten, dass bei einem Erfolg Syrakus' über die Mamertiner die unteritalischen Griechenstädte zu neuem Selbstbewusstsein finden und gegen die römische Vorherrschaft aufbegehren könnten. Karthago seinerseits war zunächst vor allem bemüht, das Vormachtsstreben der Tyrannen von Syrakus zu bremsen, sah dann aber durch die römische Intervention seine eigenen Interessen auf Sizilien ernsthaft gefährdet.

Der Krieg entbrannte zwar auf und vor Sizilien, in Wirklichkeit ging es aber um die Vorherrschaft im westlichen Mittelmeer. Und da für beide Seiten der Bestand ihrer Machtstellung auf dem Spiel stand, entbrannte ein langwieriger und verlustreicher Kampf, ein Kräftemessen mit wechselseitigem Erfolg und überraschenden Wendungen. So waren die Römer erfahren im Kampf zu Lande, doch den Rammsporen der punischen Galeeren hatten sie zunächst wenig entgegenzusetzen.

Umso überraschender war der Sieg Roms über die karthagische Flotte bei Mylae 260 v. Chr. Doch die Ingenieure der Tiberstadt zeichneten sich schon damals durch große Lernfähigkeit und Pragmatismus aus. Eine vor der Küste Siziliens gestrandete punische Triere diente laut Polybios (etwa 200–120 v. Chr.) als Modell für die römischen Schiffe. Ein solches Fahrzeug entdeckte 1970 der britische Meeresarchäologe Hugh Frost vor der sizilianischen Küste (in der

Der »Sarkophag einer Priesterin« aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. bezeugt den kosmopolitischen Charakter Karthagos: Kopf- und Halsschmuck sind ägyptisch, das Gewand griechisch.

Karte Seite 28 zwischen Selinus und Motye). Bei der Bergung des Wracks entdeckte er, dass die Planken durchnummeriert waren, was auf eine Serienproduktion mit vorfabrizierten Teilen hindeutet. Karthago vermochte dadurch seinen Flottenbestand schnell aufzubauen, doch Rom hielt nun einen kompletten Konstruktionsplan in der Hand, der den Nachbau ungemein erleichterte. Auch wie die Punier ihr Holz bearbeiteten und mit Zapfen zusammenfügten, fanden die Gegner anhand der Anschauungsobjekte heraus.

Doch die Römer übernahmen nicht nur fremdes Wissen, sie erwiesen sich auch als innovative Baumeister und statteten ihre Schiffe mit acht Meter langen Enterbrücken aus. Polybios beschrieb detailliert ihre Funktion: An einem Mast hochgezogen, konnten sie mit einer Seilvorrichtung katapultartig auf ein feindliches Schiff geschleudert werden. Dort bohrte sich ein eiserner Dorn in die Planken, der einem Rabenschnabel glich (deshalb die Bezeichnung corvus, lateinisch »Rabe«). Nun stürmten die Legionäre das Schiff und führten dort den bewährten Kampf Mann gegen Mann. Das war ein Bruch mit der traditionellen Seekriegsstrategie »Rammen, Abrasieren der Ruderstangen und Versenken durch Feuerbrände«. An Bord der karthagischen Galeeren gab es kaum bewaffnete Kräfte, so dass die Römer bei Mylae obsiegten. Doch kriegsentscheidend war ihre Entwicklung, war diese Schlacht nicht, denn die schweren Enterbrücken hatten einen entscheidenden Nachteil: Bei unruhiger See rissen sie sich aus ihrer Verankerung und besiegelten ein ums andere Mal das Schicksal ganzer Flotten.

Die Hydra Rom

So kämpften Römer und Karthager dreiundzwanzig Jahre lang zu Lande und zu Wasser. Dank ihrer immensen Wehrkraft hatten die Römer am Ende den längeren Atem. Durch die Kontingente ihrer Bundesgenossen besaßen sie ein größeres Rekrutierungspotenzial an militärisch einsatzfähigen Menschen als Karthago, das seine Verluste immer stärker mit Söldnern ausgleichen musste. Diese waren zudem teuer und nur begrenzt zuverlässig, während die römisch-italische Miliz billig, diszipliniert und, von wenigen Ausnahmen abgesehen, treu war.

Rom ging aus dem 1. Punischen Krieg als Sieger hervor, weil es seine Verluste an Mensch und Material schneller auszugleichen vermochte. Kineas, der Minister des epirotischen Königs Pyrrhos, verglich Rom mit einer Hydra, der drei Köpfe nachwuchsen, wenn man ihr einen abschlug. Karthago musste 241 v. Chr. aufgeben. Die Bedingungen der Sieger waren demütigend. In den nach dem erfolgreichen Feldherrn benannten Lutatius-Vertrag trat es Sizilien an Rom ab und verpflichtete sich zu Reparationen von fast 95 000 Kilogramm Silber. Damit war der Kampf um die Vorherrschaft über das westliche Mittelmeer vorerst beendet.

Mit dem Verlust Siziliens, dem geostrategischen Brückenkopf zwischen Europa und Afrika, hatten sich die Gewichte im westlichen Mittelmeerraum zu Gunsten Roms verschoben. Schonungslos nutzten die Sieger Karthagos Schwäche aus und annektierten 238 v. Chr. Sardinien. Die Empörung über diese rücksichtslose Politik führte in Karthago zu einem Kurswechsel. Militärs gewannen jetzt die Oberhand. Allen voran der Familienclan der Barkiden, an ihrer Spitze Hamilkar mit dem Beinamen Barkas, »der Blitz«, der von Rom im Felde unbesiegte General. An der Spitze seines Heeres schiffte er sich im Frühjahr 237 v. Chr. zusammen mit seinem Schwiegersohn Hasdrubal und seinem ältesten ▷



Modell einer phönizischen Pentekontere. Dieses Kriegsschiff aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. hatte auf jeder Seite 50 Ruderbänke in zwei versetzt angeordneten Reihen.



Dieser Brustpanzer aus dem 4./3. Jahrhundert v. Chr. schmückte vermutlich einst einen Offizier in karthagischen Diensten. Hergestellt wurde die prachtvolle Rüstung in Unteritalien.

Sohn Hannibal nach Spanien ein. Vorrangiges Ziel seiner Mission war die Schaffung einer neuen territorialen und materiellen Machtbasis. Die Iberische Halbinsel bot beides, reiche Silberbergwerke und ein weites Land außerhalb des römischen Interessengebiets.

Dank ihrer energischen Politik gelang es den Barkiden, Karthagos Einflussbereich in Spanien kontinuierlich auszubauen. Zum Zentrum ihrer Macht avancierte das »Neue Karthago« (lateinisch Carthago Nova), das heutige Cartagena. Wohlstand ermöglichte eine rasche Wiederaufrüstung und innerhalb weniger Jahre war Roms Kontrahent genesen. Das Wetterleuchten des Kriegs kam näher, seit Hannibal, ein ebenso energischer wie genialer Feldherr, 221 v. Chr. den Oberbefehl über die karthagischen Truppen in Spanien übernommen hatte. Beherzt trat er den Feinden entgegen, die die karthagische Herrschaft in Spanien regional zu begrenzen trachteten. Mit seinem Überfall auf die mit Rom verbündete Stadt Saguntum löste Hannibal den Zweiten Punischen Krieg (218–201 v. Chr.) aus.

Der »denkwürdigste aller Kriege«, so der römische Historiker Livius (59 v. Chr.–17 n. Chr.), begann mit einem Paukenschlag. In nur fünfzehn Tagen überschritt ein 34000 Mann starkes Heer mit Zugtieren, Pferden und Elefanten die Alpen und erschien für die Römer völlig überraschend in der Po-Ebene. Hannibal hatte aus den Fehlern der Vergangenheit gelernt und den Krieg nach Italien getragen. Trotz zahlenmäßiger Unterlegenheit blieb er in mehreren Schlachten Sieger.

Bei Cannae brachte Hannibal seinem Gegner schließlich eine empfindliche Niederlage bei, die für die Römer zum nationalen Trauma wurde. Einige Militärhistoriker meinen, dass vor allem die numidischen Reiter den entscheidenden Vorteil brachten, denn auf ihren gedrungenen Pferden konnten sie äußerst wendig agieren und die römischen Legionen in die Zange nehmen. Die Elefanten hingegen werden heute nicht mehr als schlachtentscheidend angesehen.

Hannibals taktischer Fehler

70000 römische Soldaten fanden den Tod – die Legionen waren vernichtet, Rom stand wehrlos da. Doch statt die Hauptstadt des Gegners einzunehmen, führte der Punier sein Heer nach Campanien, um Roms Bundesgenossen auf seine Seite zu bringen. »Zu siegen verstehst du Hannibal, den Sieg auszunutzen verstehst du nicht«, soll sein Reiterführer Maharbal laut Livius ausgerufen haben. Doch das dürfte wohl Propaganda sein. Tatsächlich gilt heute als wahrscheinlicher, dass Hannibal niemals vorhatte, Rom zu erobern. Denn dafür fehlten ihm die notwendigen Belagerungsmaschinen und logistischen Mittel. Aus den Erfahrungen des 1. Punischen Krieges hatte er zudem richtig erkannt, dass Roms Macht auf einem Bündnissystem beruhte. Es war aber ein fataler Irrtum zu glauben, dass er es nun aushebeln könnte.

Den Römern verschaffte diese Strategie Zeit, ihr Heer zu reformieren. Die Legionen wurden in kleinere operative Einheiten (Manipel) unterteilt, die selbstständiger agieren konnten. Die Römer vermieden in der Folgezeit größere Kampfhandlungen und igelten sich in befestigten Plätzen ein. Während Hannibal kaum Nachschub erhielt und Verluste nur schwer ausgleichen konnte, trieben die Römer den Krieg wieder aus Italien hinaus: Der Konsul Publius Cornelius Scipio drängte die Punier ab 210 v. Chr. in Spanien zurück, sechs Jahre später landete er in Nordafrika. Hannibal war gezwungen Italien zu verlassen. In der Schlacht bei Zama, unweit des heutigen Sidi Jussef, verließ ihn 202 v. Chr. endgültig sein Feldherrnglück. Dank der Beweglichkeit der reorganisierten Legionen konnte Scipio das karthagische Heer schlagen.

Die Friedensbedingungen, die er den Puniern diktierte, waren hart: Verzicht auf alle außerafrikanischen Besitzungen, 10000 Talente (430000 Kilogramm Silber) Reparationen und – im Kriegsfall Waffenhilfe für Rom. Ferner durften sie außerhalb Afrikas überhaupt nicht, in Afrika nur mit Zustimmung Roms Krieg führen. Karthago war keine souveräne Großmacht mehr. Um seinen Stolz und seine Macht endgültig zu brechen, ließen die Römer die punische Flotte überdies in Flammen aufgehen.

Doch einigen Hardlinern ging das noch nicht weit genug, sie fürchteten ein Wiedererstarken der Stadt. Nicht ganz zu Unrecht, ist der eingangs geschilderte

Kriegshafen doch den archäologischen Befunden zufolge erst nach dem 2. Punischen Krieg ausgehoben worden. Vor allem der wortgewaltige Cato plädierte im Senat für die vollständige Vernichtung.

Als Mitglied einer römischen Gesandtschaft, die 153 v. Chr. zur Schlichtung karthagisch-numidischer Streitigkeiten in Karthago weilte, konnte er sich mit eigenen Augen von ihrer Wehrfähigkeit überzeugen. Fortan schloss er jede Rede, zu welchem Thema auch immer, mit dem sprichwörtlich gewordenen Diktum: *Ceterum censeo Carthaginem esse delendam* – »im übrigen bin ich der Meinung, dass Karthago zerstört werden muss«. Um seinen Worten Nachdruck zu verleihen, holte er Plutarch zufolge besonders große, frische afrikanische Feigen unter seiner Toga hervor – Symbol für die ungebrochene wirtschaftliche Potenz des Gegners, der »nur drei Tage Seefahrt von Rom entfernt ist«.

Am Ende ging Catos Rechnung auf, 150 v. Chr. erklärte Rom Karthago den Krieg. Den Vorwand hierzu hatten die Punier selbst geliefert, als sie trotz Verbots in Afrika Krieg zu führen, eine militärische Offensive gegen den Numiderkönig Massinissa starteten, einem Günstling Roms. Sie handelten zwar in Notwehr, verstießen damit aber gegen den Friedensvertrag von 201 v. Chr.

Ceterum censeo ...

Der Krieg verlief zunächst sehr schleppend. Zwei Jahre lang rannten die römischen Belagerer vergebens gegen das karthagische Bollwerk an. Erst mit Scipio wendete sich das Blatt. Zunächst stellte er die Disziplin der Truppen wieder her. Zur Landseite ließ er dann die Stadt durch eine doppelte Befestigung abgeriegeln, ferner die Hafeneinfahrt durch einen Steindamm sperren, eine eilig aufgestellte Flotte der Karthager ausschalten und schließlich den Außenkai des Handelshafens besetzen. Dann wandte sich Scipio gegen die letzten Stützpunkte der Karthager im Landesinnern. Im Frühjahr 146 v. Chr. setzten seine Truppen zum entscheidenden Sturm an.

Die Katastrophe von Cannae und die langjährige Anwesenheit eines feindlichen Heeres im eigenen Land hatten die Römer traumatisiert. Eine aus heutiger Sicht irrationale Angst vor einer Wiederholung der Geschichte besiegelte den Untergang Karthagos. Der Rauch über den Trümmern war noch nicht verzogen, da begannen die Römer bereits an einer Legende zu stricken. Um den politischen Gegner vor der Nachwelt ins Unrecht zu setzen, scheuten sie sich nicht, die Handelsmetropole an der Nordküste Afrikas als Reich des Bösen darzustellen. Habgierig, hinterhältig, vor allem aber treulos seien die Karthager gewesen, so notierten die Geschichtsschreiber. *Poeni foedifragi*, die »vertragsbrüchigen Punier«, war ein geläufiges Schimpfwort. Ihr größter Frevel aber sei laut Diodor von Sizilien, dass sie ihre Kinder am Tophet, dem »Platz der Verbrennung« dem Gott Baal Hammon und dessen Stellvertreterin, der Fruchtbarkeitsgöttin Tanit zu opfern pflegten.

Auch heute halten einige Wissenschaftler diesen grausigen Brauch für möglich, mythisch begründet in der Selbstverbrennung der Dido. Denn amerikanische Archäologen entdeckten in den 1970er Jahren unter Votivstelen tatsächlich Bestattungsgefäße mit verkohlten Kinderknochen. Zwischen 400 und 200 v. Chr. wurden am Tophet etwa 20000 Heranwachsende beigesetzt. Doch ist dies schon ein Beweis für Menschenopfer? Der tunesische Archäologe Fethi Chelbi sieht darin eher das Resultat einer hohen Kindersterblichkeit. Denn die Analyse der Asche aus den Urnen ergab, dass auch Föten und Totgeburten dort bestattet wurden, ebenso Lämmer und Zicklein – tierische Ersatzopfer, die man anstelle der Allerliebsten zu opfern pflegte.

Eine wachsende Zahl von Forschern geht heute davon aus, dass Tophets heilige Bezirke waren, deren Kult möglicherweise den Gefahren von Schwangerschaft oder Kindheit galt. Dann wären die Gräuelgeschichten lediglich Ausdruck eines Unvermögens: Weder Griechen noch Römer verstanden, wie ihre in weltlichen Dingen so erfolgreichen Konkurrenten mit der Trauer um ein verstorbenes Kind umgingen. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Theodor Kissel ist Althistoriker, das Römische Reich ist sein Spezialgebiet. Neben seiner eigenen Forschung betätigt er sich auch gern als freier Autor in Sachen Archäologie.

Hannibal ad Portas. Macht und Reichtum Karthagos. Ausstellungskatalog des Badischen Landesmuseums Karlsruhe, Theiss-Verlag 2004.

Karthago. Von Werner Huß, Verlag C. H. Beck, München 1995

Die Verheißung von Stammzellen

Im Schatten ethischer Kontroversen ringen Forscher um eine Verwirklichung der Stammzelltherapie. Die wissenschaftlichen Hürden sind hoch, aber nicht unüberwindbar.

Von Robert Lanza und Nadia Rosenthal

Sie sollen einmal versagende Organe regenerieren, Gewebe ersetzen oder Krankheiten heilen, für die wirksame Medikamente fehlen – nach manchen Medienberichten grenzen die Fähigkeiten von Stammzellen ans Wunderbare. Derartige therapeutische Verheißungen wecken große Hoffnungen bei betroffenen Patienten. Leider wurden etliche der aufsehenerregendsten Studienergebnisse in der Folge widerlegt und andere im Strudel der Debatten entstellt, die sich mit der Gewinnung von Stammzellen aus menschlichen Embryonen befassen.

Provokative und widersprüchliche Aussagen einiger Wissenschaftler haben in der Öffentlichkeit – und auch unter vielen Forschern – Verunsicherung darüber hervorgerufen, ob Stammzelltherapien überhaupt medizinisch machbar sind. Wenn die gesetzgeberischen und finanziellen Beschränkungen in den USA und anderen Ländern heute aufgehoben würden, könnte dann gleich morgen die therapeutische Anwendung am Patienten beginnen? Vermutlich nicht, denn bis sich die Verheißungen der Stammzellforschung erfüllen, sind noch viele technische Hindernisse zu überwinden und offene Fragen zu klären. Sicherheit geht vor. Wo stehen wir also?

Die Schwierigkeiten beispielsweise beginnen bereits damit, eine Stammzelle als solche überhaupt zu identifizieren. Um Ergebnisse vergleichen und Verfahren zur Kontrolle des Zellverhaltens bewerten zu können, müssen Forscher zunächst sicherstellen, dass die Studienobjekte tatsächlich als Quelle oder »Stamm« verschiedener Zelltypen dienen, ohne dabei ihre Fähigkeit zur Selbsterneuerung einzubüßen. Am Aussehen lassen sich Stammzellen leider nicht erkennen; sie sind durch ihr Verhalten definiert.

Praktisch Alleskönner sind die embryonalen Stammzellen, kurz ES-Zellen genannt. Vor über zwanzig Jahren haben Forscher sie erstmals bei Mäusen isoliert. In einem ganz frühen Entwicklungsstadium enthält der erst bläschenförmige Keim innen eine Art Knoten. Aus dieser Zellmasse gehen die drei verschiedenen »Keimblätter« des heranwachsenden Embryos hervor und daraus dann alle Gewebe und Organe (siehe Kasten S. 36). Aus dem Knoten isolierte ES-Zellen behalten ihr Potenzial, sich zu jedem beliebigen Zelltyp des Organismus zu entwickeln, man nennt sie daher pluripotent.

Die bisher existierenden humanen ES-Zelllinien wurden zumeist aus überzähligen Embryos von Paaren gewonnen, die eine Reagenzglasbefruchtung wünschten. Diese Zellen überstehen gewöhnlich ein Einfrieren und können sich in einer Kulturschale in unterschiedliche Zelltypen differenzieren. Doch wie die Forscher nach und nach feststellen mussten, sind diese etablierten ES-Linien nicht alle gleichwertig: Manche entwickeln sich nur zu bestimmten Zelltypen, andere wachsen in Kultur extrem langsam.

Inseln zuckender Zellen

Um gewisse Standards zu setzen und zunächst sicherzustellen, dass es sich tatsächlich um pluripotente Zellen handelt, schlug eine Gruppe amerikanischer und kanadischer Wissenschaftler zwei Testverfahren vor. Bei nichtmenschlichen ES-Zellen sind sie bereits üblich. Im einen Fall werden die Zellen in Gewebe eines Tieres injiziert. Bilden sie dort ein Teratom – einen Tumor mit Zelltypen aus allen drei Keimblättern –, ist ihre Pluripotenz bewiesen. Ein anderer Prüfstein für ES-Zellen besteht darin, sie dauerhaft zu markieren und in einen tierischen Embryo zu injizieren. Sind die Zellen nach der Geburt des Tieres in all seinen Geweben nachweisbar, so können sie ebenfalls als pluripotent gelten.

Humane Stammzellen auf diese Weise zu testen hieße jedoch, Chimären, also Mischwesen zu erzeugen, die überall im Körper auch Zellen mit menschlichem Erbgut enthalten. So etwas gilt weithin als ethisch inakzeptabel. Außerdem bie-



Die obere Verdickung im Inneren (rot) dieses menschlichen Bläschenkeims ist die Quelle für embryonale Stammzellen.

tet diese zweite Untersuchungsmethode keine Gewähr dafür, dass die Zellen auch in Kultur zur Differenzierung fähig sind.

Es gilt, verlässlichere Kennzeichen für echte pluripotente ES-Zellen zu finden. Daher versuchen viele Wissenschaftler, all die Gene zu katalogisieren, die in solchen kultivierten Zellen zu verschiedenen Zeitpunkten an- und abgeschaltet werden. Solche Genexpressionsprofile wären nicht bloß eine Art Fingerabdruck pluripotenter Zellen – sie könnten zugleich Aufschluss über die molekulare Basis der »Stammzelligkeit« geben. Allerdings haben verschiedene Projekte bisher widersprüchliche Profile ergeben, sodass die Suche nach einer eindeutigen Stammzellsignatur weitergeht.

Die Stammzellforschung zielt letztlich darauf ab, versagende Bauteile des Körpers zu regenerieren oder zu ersetzen. Das können ganz bestimmte Zellen sein, etwa die Dopamin produzierenden Neuronen im Gehirn von Parkinsonpatienten oder die Insulin erzeugenden Inselzellen in der Bauchspeicheldrüse von Diabetikern. Bisher sind jedoch die Techniken, Stammzellen zur Differenzierung in genau den gewünschten Zelltyp zu veranlassen, alles andere als perfekt. Und der menschliche Körper umfasst mehr als 200 Zelltypen.

Bleiben ES-Zellen in einer Kulturschale sich selbst überlassen, so entwickelt sich spontan ein wildes Gemisch verschiedener Gewebetypen. Fügt man zu den richtigen Zeitpunkten bestimmte Stoffe hinzu, lässt sich die Differenzierung oft in Richtung des einen oder anderen Zelltyps lenken. Allerdings scheinen manche Gewebe bevorzugt zu entstehen – zum Beispiel entwickeln sich in Kultur bereitwillig Inseln zuckender Herzmuskelzellen, während die Differenzierung in andere Gewebetypen wesentlich schwieriger zu bewerkstelligen ist.

Welche Signale embryonale Zellen während der normalen Entwicklung dazu bewegen, bestimmte Differenzierungswege einzuschlagen, ist noch unbekannt. Daher untersuchen viele Forscher die »ökologische Nische« im Embryo, um solche milieubedingten Faktoren aufzuspüren. Andere Wissenschaftler versuchen, über Expressionsprofile Gene zu finden, die eine Differenzierung in verschiedene Zelltypen steuern und sich vielleicht ein- oder ausschalten ließen.

Mit der richtigen Rezeptur die – dem Anschein nach – richtigen Zellen zu produzieren ist erst ein Teil der Aufgabe. Aus wenigen ES-Zellen lassen sich zwar Millionen von Neuronen züchten. Diese sind jedoch nur von Nutzen, wenn sie im Gehirn eines Patienten auch funktionsfähige Verbindungen mit anderen Neuronen herstellen können.

Außerdem kann der Anschein trügen. Im Jahr 2001 berichtete Ronald McKay von den US-amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland), seine Arbeitsgruppe habe aus ES-Zellen der Maus Pankreaszellen gezüchtet, die Insulin produzieren. Damit schien ein größerer Durchbruch zu einem der hochrangigen Ziele der Stammzellforschung gelungen. Letztes Jahr jedoch versuchte Douglas A. Melton von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) McKays Ergebnisse zu reproduzieren und musste feststellen, dass die Zellen das Hormon nicht erzeugten, sondern aus dem Nährmedium aufnahmen. Die Entwicklung zuverlässiger Indikatoren für wirklich funktionierende Zielzellen ist somit eine weitere dringliche Aufgabe der Stammzellforscher. ▷

IN KÜRZE

- **Die Hoffnung**, geschädigte Gewebe oder Organe mit Hilfe von Stammzellen ersetzen beziehungsweise regenerieren zu können, hat wissenschaftliche und ethische Kontroversen entfacht.
- **Embryonale Stammzellen** sind pluripotent – das heißt, im Prinzip lassen sich aus ihnen alle Zelltypen des Organismus erzeugen. Die Forschung ist jedoch noch weit davon entfernt, das Verhalten von Stammzellen zu verstehen und sie kontrolliert einsetzen zu können.
- **Adulte Stammzellen** – also solche, die im erwachsenen Körper vorkommen – lassen sich möglicherweise leichter zu manchen Aufgaben heranziehen. Doch ob ihr Ursprung wirklich im eigenen Gewebe liegt und wie weit ihre regenerativen Fähigkeiten gehen, bleibt noch zu klären.
- Bis zur breiten Anwendung von **Stammzelltherapien beim Menschen** sind außer vielen wissenschaftlichen auch politische Hürden zu überwinden.

Was sind embryonale Stammzellen?

In einem ganz frühen Entwicklungsstadium enthält ein Embryo noch Zellen, aus denen jeder Zelltyp des Körpers hervorgehen kann. Sie sind pluripotent. Embryonale Stammzellen, wie Forscher sie verwenden, leiten sich davon ab.

Etwa eine Woche nach der Befruchtung der Eizelle ist der menschliche Keim zu einer Art Hohlkugel aus 100 bis 150 noch undifferenzierten Zellen herangewachsen. Aus der Schale dieses so genannten Bläschenkeims entstehen, wenn er sich jetzt in die Gebärmutter einnistet, später Teile der Plazenta. Nur dann kann sich eine Zellansammlung in seinem Inneren, der Embryonalknoten, zum Körper weiterentwickeln. Zur dritten Woche hin beginnen sich die Zellen dort zu spezialisieren und in dem nun Becherkeim genannten Gebilde drei Zellschichten auszubilden. Aus diesen Keimblättern gehen jeweils verschiedene Gewebe und Organe hervor.

befruchtete Eizelle (1. Tag)

Wandzellen

Bläschenkeim (5.–6. Tag)

wachsende Zellkolonien

innere Zellmasse (Embryonalknoten)

Becherkeim (14.–16. Tag)

Kolonie embryonaler Stammzellen

Kulturschale

embryonale Keimblätter und einige davon abstammende Gewebe und Organe

Entoderm (inneres Keimblatt)

Bauchspeicheldrüse
Leber
Schilddrüse
Lunge
Blase
Harnröhre

Mesoderm (mittleres Keimblatt)

Knochenmark
Skelettmuskeln
glatte Muskulatur
Herzmuskel
Blutgefäße
Nierenkanälchen



Ektoderm (äußeres Keimblatt)

Haut
Neuronen
Hypophyse
(Hirnanhangdrüse)
Augen
Ohren

ANDREW SWIFT

Anzucht embryonaler Stammzellen

Für die Gewinnung von menschlichen ES-Zellen verwenden Wissenschaftler gewöhnlich so genannte überzählige Embryonen, die bei einer In-vitro-Fertilisation erzeugt, aber nicht mehr implantiert wurden. Die innere Zellmasse des Bläschenkeims kommt in eine Kulturschale mit einer Unterlage aus »Nährzellen«. Binnen weniger Tage wachsen weitere Zellen heran, bilden Kolonien (mikroskopische Aufnahme oben). Die neu entstandenen Zellen werden nur dann formal als embryonale Stammzellen bezeichnet, wenn sie folgenden zwei Kriterien genügen: Sie tragen molekulare Kennzeichen embryonaler Stammzellen und lassen sich in Kultur passagieren – das heißt, sie bilden immer wieder neue Kolonien mit denselben Eigenschaften. Es handelt sich um eine stabile, gewissermaßen unsterbliche Zelllinie.

▷ Ein besonders eleganter therapeutischer Ansatz wäre, ES-Zellen einfach in das Organ einzubringen, dessen Gewebe regeneriert werden soll, und sie auf Signale aus der natürlichen Umgebung reagieren zu lassen. Doch ist dieser Ansatz gerade wegen der Pluripotenz der Stammzellen für die Anwendung am Menschen zu gefährlich. Die Zellen könnten ein Teratom bilden oder sich in unerwünschte Zelltypen differenzieren. In Tierexperimenten bildeten sich zum Beispiel Teratome, die vollständige Zähne enthielten.

Viele Forscher beschreiten inzwischen einen Mittelweg. Sie wollen Stammzellen vor der Anwendung am Patienten in ein stabileres, aber immer noch flexibles Vorläuferstadium überführen, das unkontrollierte Entwicklungen ausschließt und den Zellen dennoch ermöglicht, auf Milieufaktoren im Wirtsgewebe zu reagieren. Dadurch sollte der gewünschte Zelltyp entstehen.

Doch selbst wenn diese Vorläuferzellen ein ihrer Umgebung angemessenes normales Gewebe bilden, wird das Immunsystems sie angreifen. Denn embryonale Stammzellen und aus ihnen entstandene Gewebe tragen wie transplantierte Organe verräterische Oberflächenmerkmale. Anhand dieser Antigene können sie als fremd erkannt und abgestoßen werden. Hunderte Kombinationen verschiedener Typen von Antigenen sind möglich. Man müsste daher Zellbanken mit wohl Hunderttausenden verschiedener ES-Linien aufbauen, damit einmal für die meisten Patienten passende Zellen zur Verfügung stehen. Dafür wären Millionen überzähliger Embryonen aus Kliniken nötig, die In-vitro-Befruchtungen durchführen.

Einige Wissenschaftler vermuten, dass weit weniger ES-Zelllinien reichen würden, wenn es gelänge, die Patienten zu desensibilisieren oder die so genannte Immunogenität der Zellen herabzusetzen. Die Machbarkeit ist jedoch noch nicht schlüssig belegt.

Als derzeit einzige Möglichkeit, eine Abstoßung garantiert zu umgehen, bleibt das Klonen. Genauer: durch Zellkerntransfer in eine unbefruchtete Eizelle letztlich eine individuelle ES-Zelllinie herzustellen, die das genetische Material des Patienten selbst enthält. Die denkbare Anwendung solcher Verfahren beim Menschen ist zwar heftig umstritten, von praktischen Hürden ganz zu schweigen. Doch in Tierexperimenten lieferte dieser Ansatz bereits ermutigende Resultate bei der Regeneration von Geweben, die ihre Funktion nicht mehr erfüllten.

Das Klonen dreht gewissermaßen die Uhr zurück. Ist eine Zelle bei Säugetieren erst einmal auf einen bestimmten Typ festgelegt, somit »enddifferenziert«, gibt es normalerweise kein Zurück. Diese Regel lässt sich brechen, wenn man den Kern einer Körperzelle in eine unbefruchtete Eizelle überträgt, deren eigenes Erbgut zuvor entnommen wurde. Durch geeignete Tricks verhält sich die Eizelle so, als sei sie befruchtet, und beginnt sich zu teilen. Es entsteht ein Keimbläschen. Daraus gewonnene ES-Zellen enthalten das Erbgut des Zellkernspenders. Das genetische Material aus der Körperzelle ist also auf den Embryonalzustand zurückprogrammiert und damit in der Lage, jeden Gewebetyp zu regenerieren.

Die erste geklonte menschliche Stammzelllinie

Vor einigen Monaten hat einer von uns (Lanza) mit seinem Team partiell differenzierte Stammzellen aus einem geklonten Mäuse-Embryo in das Herz der Spendermaus injiziert. Dort siedelten sich die Zellen in einem Bereich an, der zuvor durch einen gezielt gesetzten Infarkt geschädigt worden war. Binnen eines Monats ersetzten sie dort 38 Prozent des Narbengewebes durch gesundes Muskelgewebe (Abbildung unten).

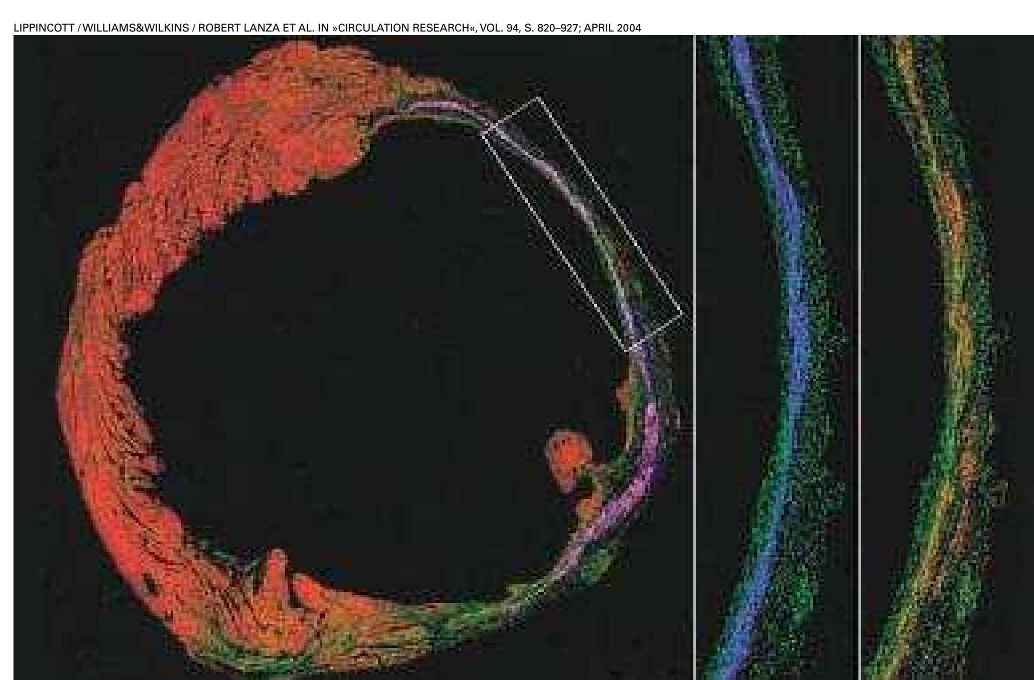
Manch ein Wissenschaftler hegte Zweifel, ob sich mit dem beschriebenen Verfahren auch bei Primaten therapeutisch nutzbare ES-Zelllinien erzeugen lassen. Im Februar 2004 verkündete jedoch Woo Suk Hwang mit seinen Kollegen an der Nationalen Universität von Seoul einen Erfolg. Sie hatten einen humanen Kerntransfer-Embryo erzeugt, ihn zum Keimbläschen heranwachsen lassen und aus der inneren Zellmasse erstmals auf diesem Wege eine humane pluripotente ES-Zelllinie gewonnen.

Dieses Experiment ist zwar ein wichtiger Meilenstein der Stammzellforschung, zeigt aber in seinen Details, wie viele Probleme noch zu lösen sind. Hwangs Gruppe hatte immerhin 242 gespendete Eizellen zur Verfügung. Die Wissenschaftler konnten damit in jedem Stadium ihres Experiments Variationen erproben, um ihre Methode zu optimieren. Dennoch bestand die Ausbeute aus lediglich einer einzigen ES-Zelllinie. Tatsächlich gestehen die Forscher ein, dass sie derzeit nicht genau wissen, welche Voraussetzungen diesen Erfolg ermöglichten. Hier hat die Wissenschaft noch viel zu lernen: über die mysteriösen Mechanismen der genetischen Reprogrammierung in der Eizelle und warum das Erzeugen und Kultivieren eines Kerntransfer-Embryos so oft schief geht.

Zum Beispiel ist unklar, ob die Reprogrammierung oder andere Aspekte der Embryonenmanipulation zu Muta- ▷

▼ Eine Maus erlitt einen ausgedehnten Infarkt in der Wand der linken Herzkammer, hier im Querschnitt zu sehen. Geklonte Stammzellen, in den Herzmuskel eingespritzt, regenerierten in einem Monat 38 Prozent des Gewebeschadens. Die vergrößerten Ausschnitte zeigen die geklonten Zellen blau und die regenerierten Herzmuskelzellen rot.

LIPPINCOTT / WILLIAMS&WILKINS / ROBERT LANZA ET AL. IN »CIRCULATION RESEARCH«, VOL. 94, S. 820–927; APRIL 2004



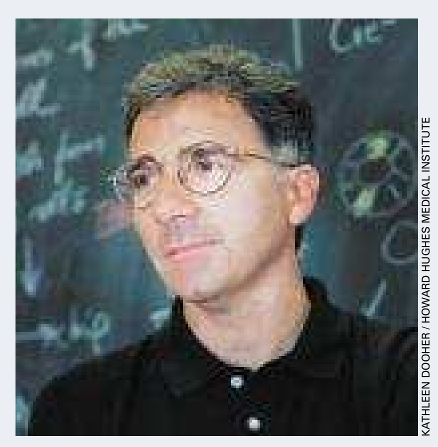
Das größte Hindernis: Politik

Forschung an Stammzellen von Erwachsenen ist ethisch nicht umstritten und unterliegt keinen Beschränkungen. Wie vielseitig die adulten Stammzellen wirklich sind, bleibt aber noch zu beweisen. Nach Auffassung vieler Forscher besitzen embryonale Stammzellen, kurz ES-Zellen, ein höheres medizinisches Potenzial. Es zu erforschen und nutzbar zu machen werde jedoch durch restriktive Gesetze und mangelhafte finanzielle Förderung vielerorts erheblich behindert.

Großbritannien, Singapur, Südkorea, China, Japan und einige andere Länder unterstützen dagegen die Forschung an humanen ES-Zellen großzügig mit öffentlichen Mitteln. Im Europäischen Parlament kam bisher keine Einigung über einen Gesetzesentwurf zu Stande, sodass es den einzelnen EU-Ländern überlassen bleibt, nationale Regelungen zu erlassen. Eine Initiative der Vereinten Nationen zur Erarbeitung einer weltweit gültigen Konvention hat bis Redaktionsschluss keine Entscheidung gebracht: Soll Klonen schlechthin, auch das therapeutische zur Gewinnung patienteneigener embryonaler Stammzellen, verboten werden?

In den Vereinigten Staaten dürfen Wissenschaftler, deren Arbeit mit Regierungsgeldern gefördert wird – also die große Mehrzahl der Forscher in akademischen und industriellen Labors –, nur mit Stammzelllinien arbeiten, die vor dem 9. August 2001 erzeugt wurden. Auch Deutschland hat einen Stichtag: den 1. Januar 2002. Zudem müssen Import und Verwendung solcher im Herkunftsland legal erzeugten Zelllinien für Forschungszwecke vom Robert Koch-Institut in Berlin genehmigt werden.

In den USA stehen der Wissenschaft nur etwa fünfzehn der freigegebenen ES-Zelllinien überhaupt zur Verfügung. Einige davon sind irgendwie kränklich und schwierig zu züchten, andere zeigen inzwischen genetische Anomalien. Zudem wurden alle Zelllinien über längere Zeit in Nährmedien gehalten, die Mäusezellen enthielten, und könnten daher mit tierischen Viren kontaminiert sein. Die amerikanische Arzneimittelaufsicht, die Food and Drug Administration FDA, prüft daher derzeit, ob Studien mit diesen Zellen am Menschen untersagt werden müssen.


KATHLEEN DOOHER / HOWARD HUGHES MEDICAL INSTITUTE

Allein 17 neue ES-Zelllinien erzeugte Douglas A. Melton von der Harvard-Universität. Private Geldgeber hatten die Arbeit finanziert.

Douglas A. Melton von der Harvard-Universität, dessen Kinder beide an Diabetes mellitus vom Typ 1 leiden, ist ein entschiedener Kritiker der derzeitigen Politik. Im Februar gab er die Herstellung von 17 neuen ES-Zelllinien bekannt. Seine Arbeit hatten ausschließlich private Geldgeber finanziert. Die Zelllinien sind zwar frei verfügbar, die meisten amerikanischen Wissenschaftler sehen sich jedoch zurzeit nicht in der Lage, die Auflagen der Regierung zu erfüllen und wie Melton ein separates Labor für die ES-Zellforschung aufzubauen, in dem keine einzige Pipette mit staatlichen Mitteln bezahlt ist. Die Entwicklung neuer Linien macht Sinn, weil sich inzwischen die Methoden der Stammzellzucht erheblich verbessert haben.

Angesichts des enormen medizinischen und ökonomischen Potenzials gewährte immerhin Kalifornien der Stammzellforschung bereits 2002 als erster US-Bundesstaat offizielle Billigung. Im November entschieden die Wähler zugunsten von 3 Milliarden Dollar bundesstaatlicher Fördergelder. Auch New Jersey sprach sich im vergangenen Jahr für die Stammzellforschung aus und stellte die Bewilligung von 50 Millionen Dollar an Fördermitteln über fünf Jahre in Aussicht.

Christine Soares

Die Autorin ist Redakteurin von Scientific American.

▷ tionen führen, die geklonte ES-Zellen womöglich eher zu Krebszellen entarten oder vorzeitig altern lassen. Im Falle von Erbleiden wie Bluterkrankheit oder Muskeldystrophie müssten außerdem die entsprechenden angeborenen Gendefekte in den geklonten ES-Zellen korrigiert werden, bevor diese zur Behandlung eingesetzt werden könnten. Das stellt jedoch kein grundsätzliches Hindernis dar, da geeignete gentechnische Verfahren, die bei ES-Zellen von Mäusen bereits Routine sind, auch bei den humanen Pendants funktionieren.

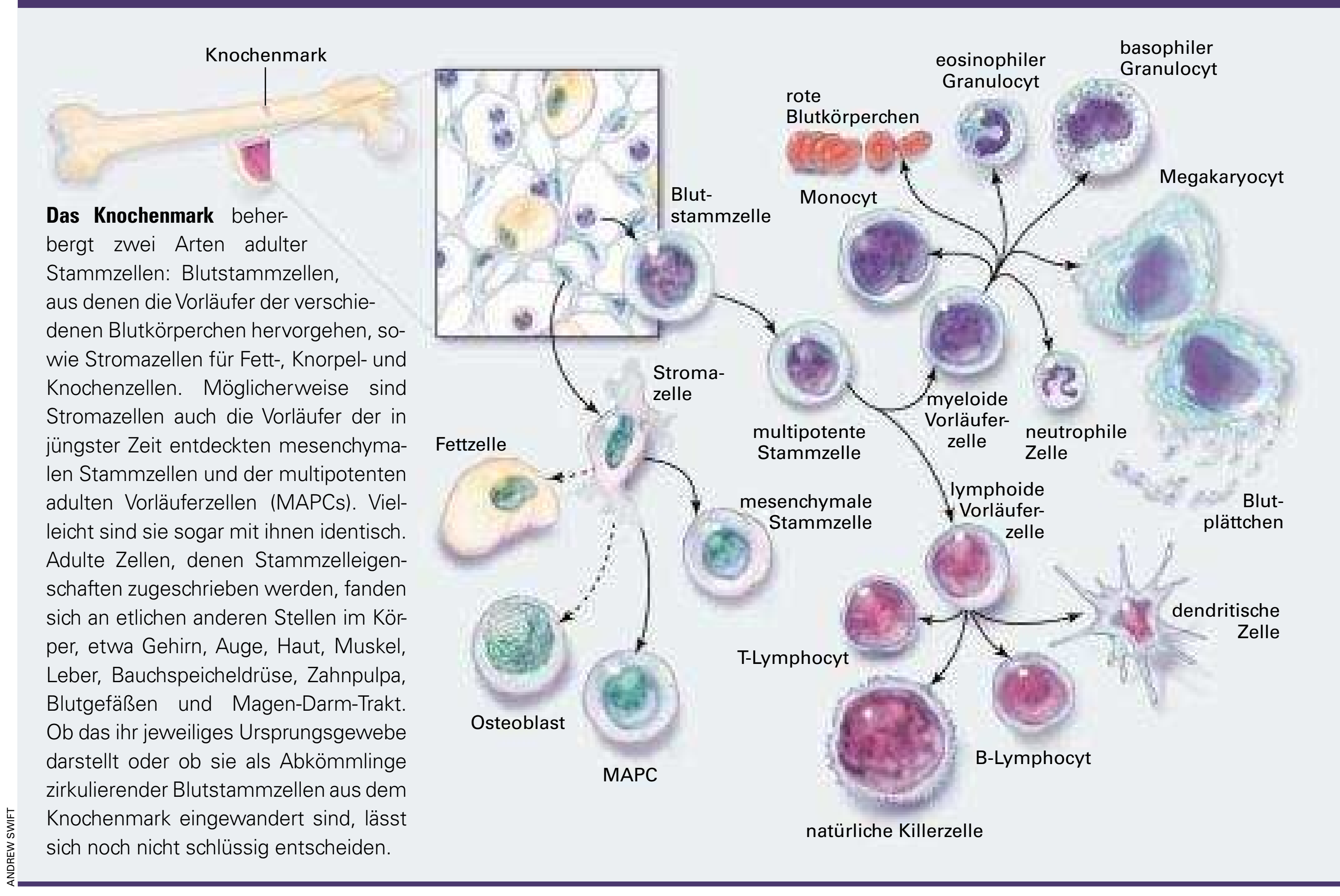
Embryo aus Jungfernzeugung

Der Umstand, dass geklonte Tiere ungewöhnlich oft Missbildungen tragen und vorzeitig sterben, weckte auch Zweifel am »allgemeinen Gesundheitszustand« von ES-Zellen aus Kerntransfer-Embryonen. Allerdings: Wird das regenerative Potenzial tierischer ES-Zelllinien durch Injektion in ein Keimbläschen getestet, entstehen anscheinend völlig normale Tiere. Dies weist darauf hin, dass durch Zellkerntransfer erzeugte ES-Zellen – zumindest für therapeutische Zwecke – gewöhnlichen ES-Zellen gleichzusetzen sind. Hingegen ist das so genannte reproduktive Klonen für die Anwendung beim Menschen eindeutig zu unsicher.

Ähnliche Sicherheitsprobleme bleiben auch bei einer weiteren Technik zu lösen, bei der ES-Zellen ohne Kerntransfer oder Reagenzglasbefruchtung hergestellt werden. Unbefruchtete Eizellen lassen sich durch chemische Tricks zur Teilung anregen, als wären sie befruchtet. Bei dieser Jungfernzeugung, fachlich Parthenogenese genannt, entstehen Pseudoembryonen. Sie sind viel einfacher zu züchten als Kerntransfer-Embryonen. In Tierexperimenten wurden aus ihnen ES-Zellen gewonnen, die sich in Kultur zu verschiedenen Zelltypen entwickelten und im Teratomtest Zelltypen aller drei Keimblätter ausbildeten.

Anders als normale Körperzellen, die über je einen mütterlichen und einen väterlichen Chromosomensatz verfügen, gibt es bei einem Pseudoembryo zwei identische Kopien des mütterlichen Satzes, aber keinen väterlichen. Damit hat ein solcher Embryo zwar ein numerisch vollständiges Genom, ist aber nach der Reimplantation in die Gebärmutter nicht überlebensfähig. Der praktische Vorteil nur eines »Elter«: Die Zahl möglicher Kombinationen von Antigenen reduziert

Stammzellreservoir im Knochenmark



Das Knochenmark beherbergt zwei Arten adulter Stammzellen: Blutstammzellen, aus denen die Vorläufer der verschiedenen Blutkörperchen hervorgehen, sowie Stromazellen für Fett-, Knorpel- und Knochenzellen. Möglicherweise sind Stromazellen auch die Vorläufer der in jüngster Zeit entdeckten mesenchymalen Stammzellen und der multipotenten adulten Vorläuferzellen (MAPCs). Vielleicht sind sie sogar mit ihnen identisch. Adulte Zellen, denen Stammzelleigenschaften zugeschrieben werden, fanden sich an etlichen anderen Stellen im Körper, etwa Gehirn, Auge, Haut, Muskel, Leber, Bauchspeicheldrüse, Zahnpulpa, Blutgefäßen und Magen-Darm-Trakt. Ob das ihr jeweiliges Ursprungsgewebe darstellt oder ob sie als Abkömmlinge zirkulierender Blutstammzellen aus dem Knochenmark eingewandert sind, lässt sich noch nicht schlüssig entscheiden.

sich drastisch. Somit würde vermutlich eine Bank mit weniger als tausend verschiedenen parthenogenetisch erzeugten ES-Zelllinien ausreichen, um für den Großteil der amerikanischen Bevölkerung passende Zellen bereitzuhalten.

Wann ES-Zelltherapien erstmals beim Menschen getestet werden können, hängt mindestens im gleichen Maße von den politischen Gegebenheiten ab wie von den weiteren wissenschaftlichen Fortschritten (siehe Kasten links). Aus ES-Zellen erzeugte, gut untersuchte und einfach zu kultivierende Zelltypen wie etwa Dopamin-Neuronen oder Pigmentepithelzellen der Netzhaut könnten in weniger als zwei Jahren für Studien an Patienten bereitstehen. Angesichts des außerordentlichen Regenerationspotenzials der ES-Zellen wurde jedoch in den letzten Jahren auch die Suche nach ähnlich gearteten Zellen im »fertigen« Körper intensiviert.

Selbstreparatur ist immerhin möglich: Die menschliche Haut startet sofort nach einer Verletzung die Wundheilung, die Leber kann innerhalb weniger Wochen 50 Prozent ihrer Masse regenerieren, und unsere roten Blutkörperchen werden mit einer Rate von 350 Millionen Zellen pro Minute ersetzt. In solchen rasch regenerierenden Geweben und Systemen müssen äußerst teilungsaktive Stammzellen am Werk sein. Umso interessanter ist die Frage, weshalb andere Organe wie Gehirn und Herz dies offenbar nicht nennenswert tun, obwohl bei ihnen in jüngster Zeit ebenfalls Zellen mit Stammzellpotenzial entdeckt wurden.

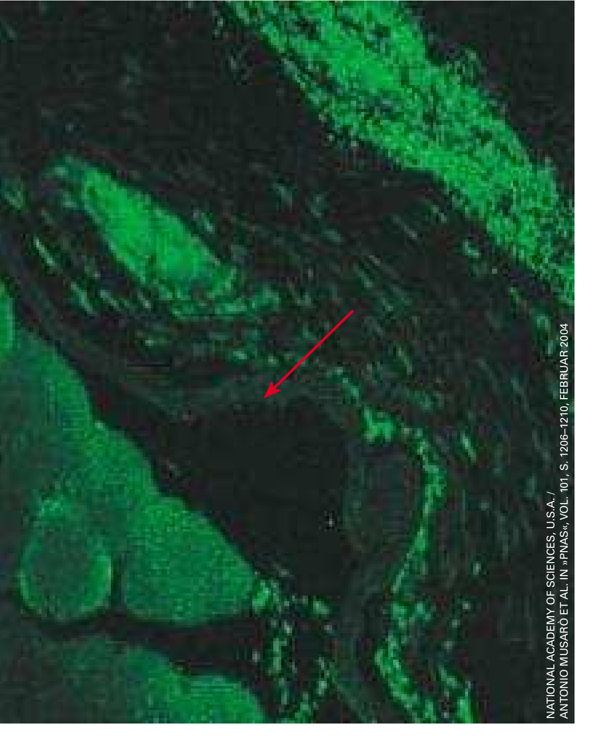
Ermutigende Resultate am Herz

Am besten untersucht sind die Blutstammzellen des Knochenmarks, aus denen mehr als ein halbes Dutzend verschiedener Arten von Blut- und Immunzellen hervorgeht (siehe Kasten oben). Da sie Nachschub für mehrere Mitglieder wenigstens einer Zellfamilie liefern, werden sie als multipotent bezeichnet. Große Hoffnung besteht, dass ähnliche multipotente Stammzellen anderer Gewebe direkt zur Reparatur eines geschädigten Areals herangezogen werden könnten. Dies ersparte den Umweg über Embryonen. Noch günstiger wäre es allerdings, wenn erwachsene – adulte – Stammzellen gefunden würden, die in ihrer Vielseitigkeit der Pluripotenz embryonaler Zellen nahe kommen.

Wird eine Regeneration in den von Natur aus weniger reparaturfreudigen Geweben nur irgendwie blockiert? Und wenn ja, ließe sich diese Blockade aufheben? Die Forscher stehen erst am Anfang. Selbst der Umfang des regenerativen Potenzials adulter Stammzellen ist noch umstritten, ebenso ihre genaue Herkunft. So weiß keiner definitiv,

- ob gewebespezifische Stammzellen in den Organen selbst bereitgehalten werden oder als Abkömmlinge von Blutstammzellen aus dem Knochenmark einwandern,
- in welchem Umfang solche Zellen zur Differenzierung in Zelltypen außerhalb ihres ursprünglichen Spektrums angeregt werden können
- und ob sich eine solche im Labor erreichbare »Transdifferenzierung« in einem lebenden Organismus reproduzieren lässt.

▷



Ein Beinmuskel einer Maus produzierte auf Grund einer Verletzung (Pfeil) das Signalprotein IGF-1. Stammzellen aus dem Knochenmark, kenntlich an einer grünen Fluoreszenzmarkierung, suchten gezielt das zerstörte Gewebe auf und begannen mit der Regeneration.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, U.S.A. / ANTONIO MUSARÒ ET AL. IN »PNAS«, VOL. 101, S. 1206–1210, FEBRUAR 2004

Die Idee, manche adulten Stammzellen könnten mehr als gedacht, kam erstmals auf, als nach Knochenmarkspenden Abkömmlinge der fremden Zellen schließlich in ganz unterschiedlichen Geweben des Empfängers auftauchten. Daraus zogen einige Forscher den Schluss, Stammzellen des Knochenmarks seien unter geeigneten Bedingungen in der Lage, sich am Aufbau praktisch jedes Gewebes zu beteiligen. Ähnliches wurde übrigens auch für so genannte fetale Stammzellen aus Nabelschnurblut vermutet, die den Blutstammzellen ähneln.

Versuche, die erhoffte Vielseitigkeit experimentell direkt am lebenden Organismus zu belegen, lieferten allerdings kein konsistentes Bild. Wie zwei unabhängige Arbeitsgruppen – eine um Leora Balsam an der Universität Stanford (Kalifornien) und eine um Charles E. Murry an der Universität von Washington in Seattle – im März 2004 berichteten, ließ sich trotz Einsatz hochsensitiver Methoden nicht nachweisen, dass Blutstammzellen zur Regeneration eines geschädigten Herzmuskels beitragen.

Was man allerdings immer öfter feststellt: Blutstammzellen fusionieren vielfach mit Zellen des Herzmuskels, der Leber oder des Gehirns. Dieses Phänomen könnte eine Transdifferenzierung vortäuschen. Daher ist bei künftigen Studien zum wahren Potenzial von adulten Stammzellen unbedingt auszuschließen, dass die Zellen nur mit den lokal vorhandenen verschmelzen, statt wunschgemäß neue zu erzeugen.

Trotz allem – zumindest mit gewebespezifischen Stammzellen wurden bereits ermutigende Ergebnisse erzielt. Im Rahmen der deutschen TOPCARE-AMI-Studie bekamen Infarktpatienten mit schweren Schäden des Herzmuskels eigene Herzmuskelvorläuferzellen injiziert, und zwar direkt in das betroffene Areal. Vier Monate später hatte es sich um durchschnittlich fast 36 Prozent verkleinert, die Herzfunktion verbesserte sich um zehn Prozent.



Leider liefern die Gewebe Erwachsener nur eine spärliche Menge an Stammzellen. Dies stellt das größte technische Hindernis dar, das der breiteren klinischen Erforschung solcher Verfahren im Wege steht. Im Knochenmark von Mäusen liegt der Anteil der Stammzellen bei 1 zu 10 000; beim Menschen ist dieses Verhältnis womöglich noch ungünstiger. Zudem gibt es in den meisten Geweben keinen festen Ort für Stammzellen, und sie anhand von Oberflächenmarkern und Genexpressionsmustern zu identifizieren ist bisher nur begrenzt möglich.

Hat man endlich Stammzellen isoliert, so wachsen sie in Kultur sehr langsam und verlangen viel Pflege. Wie gesagt: Über die Faktoren, die im Organismus über das Schicksal von Stammzellen, ob embryonal oder adult, entscheiden, wissen wir noch viel zu wenig. Somit bleibt abzuwarten, ob eine längere Kultivierung ihre Fähigkeit zur Regeneration von Gewebe beeinträchtigt.

Alarm im Gewebe

Statt adulte Stammzellen eines Patienten aufzuspüren, sie zu isolieren, zu kultivieren und dann zu reimplantieren, ist es daher möglicherweise erfolgversprechender, die im Körper versteckten Zellreserven durch Wirkstoffe zu aktivieren. Offenbar reagieren Stammzellen auf gängige chemische Signale des Körpers und lassen sich so an den Ort eines Gewebeschadens führen. Die Hinweise darauf verdichten sich. Eine von uns (Rosenthal) wies kürzlich bei Mäusen nach, dass Stammzellen von weit her zuwandern, wenn das Signalprotein IGF-1 Alarm gibt und sie anlockt (Foto oben).

Um dem Körper eines Tages Hilfe zur Selbsthilfe geben zu können, müssen jedoch die Funktionen solcher Signalfaktoren erst wesentlich besser verstanden werden. IGF-1 etwa könnte – so unser Verdacht – zu noch etwas anderem beitragen: dass einige der geschädigten Zellen im betroffenen Areal in einen multipotenten Zustand zurückkehren und sich dann in die benötigten Typen von Zellen und Geweben differenzieren. Auf diesem Phänomen, fachlich epimorphe Regeneration genannt, basiert die erstaunliche Fähigkeit von Molchen und Zebrafischen, ganze Extremitäten und Organe zu ersetzen.

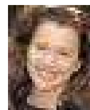
Der Stein der Weisen in der regenerativen Medizin wäre eine Substanz, die Gewebe zu einer solchen kontrollierten

Entdifferenzierung bewegt – im Grunde also ausdifferenzierte Zellen vor Ort in Stammzellen zurückverwandelt. Nach Substanzen, die dieses Wunder vollbringen sollen, suchen viele Forscher. Einige Erfolge sind ansatzweise bereits zu verzeichnen. Der therapeutische Einsatz der kontrollierten Entdifferenzierung liegt jedoch in weiter Ferne. Ohne ein wesentlich genaueres Verständnis des Verhaltens von Stammzellen adulter oder embryonaler Herkunft wird er höchstwahrscheinlich nicht gelingen.

Wie so oft in der Naturwissenschaft wirft auch die Forschung an Stammzellen mindestens so viele neue Fragen auf, wie sie bisher beantwortet hat – doch sie kommt voran. Die ersten ermutigenden Tests adulter humaner Stammzellen zur Therapie von Herz-Kreislauf-Erkrankungen werden sicherlich Anreiz sein, in naher Zukunft größere Studien durchzuführen. Und angesichts viel versprechender tierexperimenteller Daten sind bereits in Kürze erste klinische Studien zum Einsatz von ES-Zellen bei degenerativen Erkrankungen des Zentralnervensystems zu erwarten.

Was immer auch an Problemen besteht – das Ziel, Ersatzzellen zu erzeugen und Organe zu regenerieren, halten wir für realistisch und erreichbar. Die Hindernisse auf dem Weg dorthin sind groß, doch nicht unüberwindlich. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Robert Lanza ist medizinischer Direktor der Firma Advanced Cell Technology und lehrt zugleich am Institut für Regenerative Medizin an der Wake-Forest-Universität in Winston-Salem (Nordcarolina). Seine Forschungsarbeiten konzentrieren sich derzeit auf embryonale Stammzellen. **Nadia Rosenthal** leitet das Europäische Molekularbiologische Labor (EMBL) in Rom und das Mausbiologie-Programm. Sie erforscht unter anderem die Regeneration neuromuskulärer und kardialer Gewebe mit Stammzellen.

Stammzellen. Von E. J. Wormer. Lingen-Verlag, Köln 2003

Regeneration of the infarcted heart with stem cells derived by nuclear transplantation. Von Robert Lanza et al. in: Circulation Research, Bd. 94, Nr. 6, S. 820, 2004

Prometheus's vulture and the stem-cell promise. Von Nadia Rosenthal in: New England Journal of Medicine Bd. 349, Nr. 3, S. 267, 17. Juli 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PFEIFENORGEL

Wunder der Mechanik

Die Königin der Instrumente ist auch eine ausgetüftelte Maschine.

Von Mark Fischetti und Klaus-Dieter Linsmeier

Weihnachten ist die hohe Zeit der Orgel. Dann erklingen die Werke alter Meister in den Kirchen, mal lieblich säuselnd, mal so urgewaltig, dass das Gotteshaus erzittert. Ein virtuoser Organist vermag mit den größten Instrumenten, die je gebaut wurden, eine Vielfalt von Klangfarben hervorzubringen – vorausgesetzt die technische Basis stimmt: Noch heute erfordert die Fertigung dieser Musikmaschinen ein hohes Maß an Kreativität, Handarbeit und Erfahrung.

Das Grundprinzip ist seit der Antike bekannt: Luft (»Orgelwind«) wird in Pfeifen verschiedener Länge und damit unterschiedlicher Tonhöhe gepumpt und bringt dort Luftsäulen zum Schwingen. Ein Organist steuert diesen Vorgang über einen komplizierten Mechanismus aus »Spiel- und Registertraktur«.

In den vergangenen Jahrhunderten haben Orgelbauer verschiedene Systeme entwickelt. Am wichtigsten war und ist das der mechanischen Schleiflade. Dabei gehört zu jeder Taste genau ein Ventil, dem aber mehrere Pfeifen zugeordnet sein können. Denn unterschiedliche Bauweisen ergeben verschiedene Klangfarben (so genannte Register), die sich separat einschalten lassen. Die Kunst des Registrierens besteht darin, durch immer neue Kombinationen von Farben dem Instrument eine Vielzahl von Klängen zu entlocken.

Die Pfeifen können aus Holz oder Metall sein. Holz eignet sich für große Basspfeifen, da es bei tiefen Tönen gut in Resonanz gerät und dabei aber wenige hohe Obertöne erzeugt. Metallpfeifen bestehen gewöhnlich aus einer Zinn-Blei-Legierung. Ein hoher Bleianteil verstärkt den Grundton, während Zinn Obertöne höherer Frequenz unterstützt.

Den Wind erzeugten im Mittelalter zunächst lederne Schmiedebälge, doch lieferten sie keinen gleichmäßigen Druck. Besser waren so genannte Spanbälge, deren Falten aus Holzteilen mit Lederscharnieren bestanden. Anfang des 20. Jahrhunderts begannen elektrische Gebläse den Balg zu füllen. Parallel dazu wurden Systeme entwickelt, um die mechanische Traktur durch die neue Elektrotechnik zu ersetzen: Der Tastendruck schloss einen Stromkreis, ein Elektromagnet öffnete das Ventil.

Eine mittelgroße Kirchenorgel mit zwei Manualen, Pedal und um die 20 Register kann schon etwa 1200 Pfeifen umfassen und mit über 200 000 Euro zu Buche schlagen. Das Instrument wird vom Hersteller getestet, wieder zerlegt und am Bestimmungsort erneut aufgebaut. Jede einzelne Pfeife muss dann so intoniert werden, dass sie optimal auf die Raumakustik abgestimmt ist. Auch in Zeiten von Mikroelektronik und Digitaltechnik bleibt eine Orgel ein technisches Wunderwerk. ◁

Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American, **Klaus-Dieter Linsmeier** Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

WUSSTEN SIE SCHON?

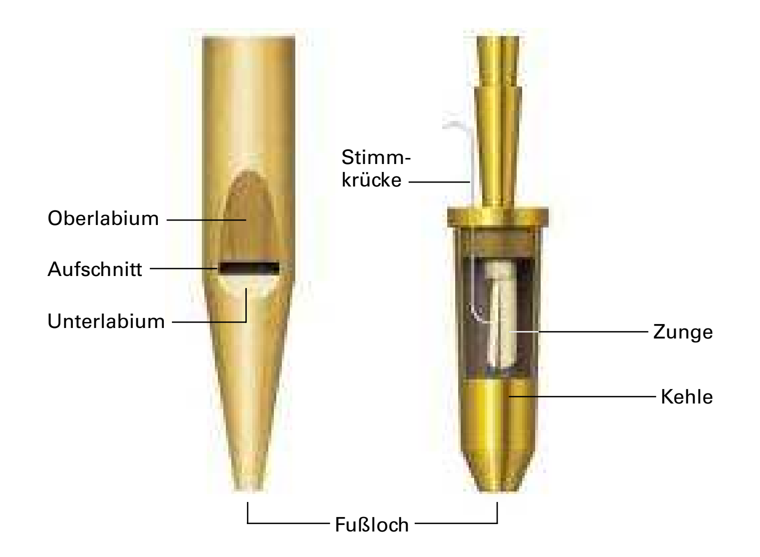
▶ **Als Ahnen der Orgel** gelten die Panflöte mit ihren verschieden langen Rohren und der Dudelsack mit seinem »Luftmagazin«. Das Prinzip der Verbindung mit einem Tastenmechanismus und einer Pumpanlage erfand der Grieche Ktebesios aus Alexandria um 250 v. Chr. Das Luftreservoir seiner Wasserorgel (Hydraulis) tauchte in einen Wasserbehälter ein, um Druckstöße auszugleichen. Dieses *organum hydraulicum* wurde in der römischen Kaiserzeit unter anderem in Amphitheatern eingesetzt. Von Byzanz aus gelangte das Instrument im 8. und 9. Jahrhundert über Gesandtschaften an den fränkischen Hof.

▶ **Soll der Klang dramatisch an- und abschwellen**, betätigt der Organist hölzerne Jalousien im so genannten Schwellwerk. Diese Technik war für Konzertsaalorgeln seit dem 19. Jahrhundert unerlässlich.

▶ **Die weltweit größte Orgel** mit mechanischer Traktur steht in der Dreifaltigkeitskirche zu Liepava (Libau) in Lettland – mit 131 Registern auf vier Manualen und einem Pedal. Sie wurde 1885 von Barnim Grüneberg aus Stettin gebaut.

▶ **Eine tragbare Orgel** für das gesellige Musizieren im Mittelalter war das einstimmig gespielte Portativ. In der Renaissance und im Barock war das Positiv, ein kleines Instrument mit nur wenigen Registern, weit verbreitet. Heute erfahren diese Orgeln neue Aufmerksamkeit.

▶ Mit komprimierter Luft beschickt ein Gebläse den Windkasten unter der Windlade. Der zwischengeschaltete Balg sorgt für einen gleichmäßigen Druck. Zieht der Organist ein Register, verschiebt er damit eine »Schleife«, eine hölzerne Leiste, samt ihren Bohrungen und gibt so den Weg zu den Pfeifen einer bestimmten Klangcharakeristik wie »Trompete« frei. Der Druck auf eine Taste öffnet über eine Mechanik, die »Spieltraktur«, eine hölzerne Klappe – das Tonventil –, sodass der Wind in die so genannte Tonkanzelle und von dort in die Pfeifen strömt. Eine Feder schließt das Ventil, wenn die Taste freigegeben wird.



Lippenpfeifen (links) erklingen, weil strömende Luft an der oberen Kante des Aufschnitts in eine Art Pendelbewegung gerät und so die Luftsäule in der Pfeife zum Schwingen anregt. Je nach Länge des Rohrs ergibt sich eine andere Tonhöhe. Das klangliche Grundgebäude einer Orgel umfasst auch oben geschlossene Lippenpfeifen, die eine Oktave tiefer klingen, als es ihrer Länge entspricht (so genannte Gedackte). Zungenpfeifen (rechts) erhalten ihren charakteristisch schnarrenden Ton durch die Vibration der »Aufschlagzunge«. Während Lippenpfeifen über eine Veränderung der Länge der Luftsäule gestimmt werden, dient dazu bei Zungenpfeifen die Stimmkrücke: ein starker, mehrfach gebogener Metalldraht, der die Länge des schwingenden Teils der Zunge begrenzt.

KENT SNODGRASS PRECISION GRAPHICS

Ein Universum voller Scheiben

Flache Wirbel aus heißem Gas umströmen sowohl junge Sterne als auch gigantische Schwarze Löcher. Neue Forschungen geben einen Einblick in die Dynamik dieser Akkretionsscheiben.



Von Omer Blaes

Schauen Sie einmal in einer klaren Nacht zum Sternenhimmel auf und versuchen Sie, einige der mit bloßem Auge sichtbaren Planeten zu finden – Merkur, Venus, Mars, Jupiter oder Saturn. Wenn Sie drei oder mehr aufgespürt haben, erkennen Sie, dass alle diese Wandelsterne grob auf einer Linie aufgereiht sind: Die Planetenbahnen verlaufen innerhalb eines schmalen Bands, das sich über das Firmament zieht. In diesem Streifen liegt auch die Ekliptik, der Weg, den die Sonne scheinbar auf ihrer jährlichen Bahn durch die Sternbilder des Tierkreises zurücklegt. Und wenn Sie nun ihren Blick dem schimmernden Band der Milchstraße zuwenden, bemerken Sie, dass dieses einen anderen großen Kreisbogen am Himmel beschreibt.

Diese beobachtete Geometrie ist kein Zufall. Die Planeten unseres Sonnensystems, einschließlich der Erde, umkreisen die Sonne in der gleichen Richtung und – mit Ausnahme von Pluto – nahezu in der gleichen Ebene. Dieses Arrangement liefert uns einen deutlichen Hinweis darauf, dass die Planeten in einer pfannkuchenartigen Materiescheibe aus Gas und Staub um die noch junge Sonne entstanden sind. Ganz ähnlich zeigt uns die Erscheinung der Milchstraße, bei der es sich um die verschwommene Anhäufung des Lichts vieler Milliarden Sterne handelt, dass unsere Galaxie ebenfalls scheibenförmig ist. Unser Sonnensystem befindet sich innerhalb dieser Scheibe, deshalb scheint sich die Galaxis als kreisförmiges Band um uns zu winden.

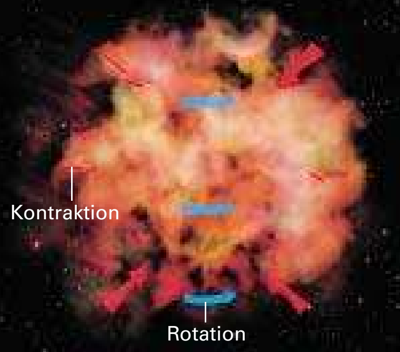
Auf scheibenförmige Strukturen unterschiedlichster Größen stoßen wir überall im Universum. Die Ringe des Saturns sind ein graziöses Beispiel in unserer näheren Umgebung, aber keineswegs das einzige: Alle Riesenplaneten in unserem Sonnensystem besitzen Ringe. Auch um viele junge Sterne be- ▷

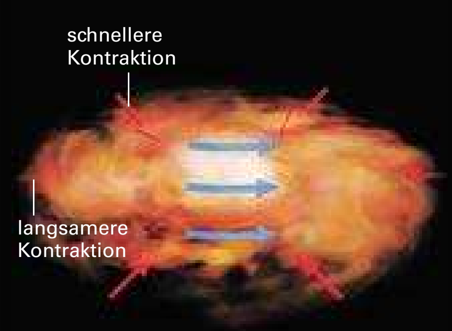
In diesem fiktiven Röntgen-Doppelsternsystem saugt ein Schwarzes Loch mit seiner gewaltigen Schwerkraft Gas vom Begleiter, einem Roten Riesen, ab. Wie Wasser an einem Abfluss bildet dieses Gas einen Strudel. So entsteht eine Akkretionsscheibe, die sich aufheizt und dadurch Röntgenstrahlung aussendet. Aus ihren innersten Bereichen schießen Teilchenjets hervor.

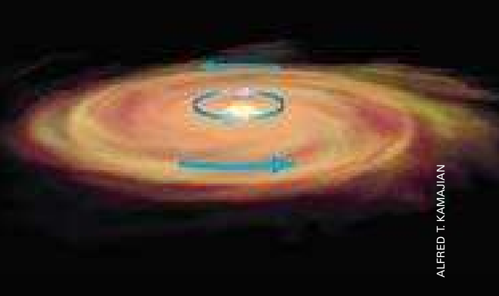
DON DIXON

Geburt einer Scheibe

Das Auftreten von Gasscheiben im Universum ist letztlich auf ein simples Naturgesetz zurückzuführen, die Drehimpulserhaltung. Der Drehimpuls eines Objekts hängt von dessen Umdrehungsgeschwindigkeit und der Massenverteilung um die Rotationsachse ab. Wenn eine Gaswolke nun schrumpft, indem die Masse zur Rotationsachse hinströmt, rotiert sie schneller.







Eine interstellare Gaswolke rotiert zunächst langsam um ihre Achse und zieht sich auf Grund ihrer eigenen Schwerkraft zusammen. Durch die Kontraktion dreht sie sich immer schneller.

In der Äquatorebene der Wolke fällt das Gas langsamer nach innen, weil die Fliehkraft der Schwerkraft entgegen wirkt. Die Gasmassen ober- und unterhalb der Ebene strömen schneller nach innen.

Im Lauf der Zeit sammelt sich das gesamte Material der Wolke in der Äquatorebene. Dort wird es durch die Rotation stabilisiert – Fliehkraft und Schwerkraft sind im Gleichgewicht.

▷ obachten wir flache Materiewolken. Die Astronomen nennen sie protoplanetare Scheiben, weil sie jenem Wirbel ähneln, aus dem unser Planetensystem entstanden ist. In manchen Doppelsternsystemen strömt Gas von einer der Komponenten ab und sammelt sich in einem flachen Gebilde um die andere herum an. Innerhalb dieser Scheibe sinkt das Gas wie in einem Strudel auf spiralförmigen Bahnen hinab zur Oberfläche des Zentralsterns. Solche Gebilde, so genannte Akkretionsscheiben, vermuten die Forscher auch um extrem massereiche Schwarze Löcher, die sich in den Zentren von Galaxien befinden und das Milliardenfache der Sonnenmasse in sich versammeln können. Die größten Scheiben sind Spiralgalaxien wie unser Milchstraßensystem, dessen Durchmesser über 100 000 Lichtjahre beträgt.

Die Allgegenwart der Scheiben macht die Beschreibung der physikalischen Abläufe in ihrem Inneren zu einem der wichtigsten Probleme der Astrophysik. Die Astronomen glauben, dass die Akkretionsscheiben um extrem massereiche Schwarze Löcher die Entstehung und Entwicklung ihrer Wirtsgalaxien beeinflussen. Und die Erforschung der Dynamik von protoplanetaren Scheiben um junge Sterne könnte uns auch neue Erkenntnisse über die frühe Geschichte unseres eigenen Sonnensystems liefern.

Das Himmelskarusell

Dank neuer theoretischer Erkenntnisse und moderner Computersimulationen gelang es den Wissenschaftlern kürzlich, die Turbulenzen in den Akkretionsscheiben zu erklären, die sie zu so mächtigen Energiequellen macht. Doch andere Phänomene, wie etwa die Teilchenströme, die oftmals von den Scheiben ausgehen, bleiben ein Rätsel.

IN KÜRZE

- **Akkretionsscheiben** sind fast überall im Universum anzutreffen: Sie umwirbeln neugeborene Sterne ebenso wie Doppelsternsysteme und Galaxienzentren. Deshalb wollen Astrophysiker ihre Dynamik verstehen.
- Um die **Strahlung der Scheiben** zu erklären, vermuten Astronomen schon lange, dass die Gasströmung sehr turbulent sein müsse. Der Grund dafür könnte ein Phänomen sein, das Magnetorotationsinstabilität genannt wird.
- Die Wissenschaftler erforschen nun, wie dieser Effekt **in den verschiedenen Arten** der Akkretionsscheiben funktioniert.

Die Rotation einer Scheibe stabilisiert sie gegen die Schwerkraft. Stellen wir uns einmal vor, wir säßen in einem Karussell, das sich gefährlich schnell dreht. Würden wir uns nicht gut genug an einem der bunt bemalten Pferdchen festhalten, so würde uns die Fliehkraft in einer geraden Linie tangential zur Kreisbewegung des Karussells herausschleudern. Die Kraft, die wir in unseren Armen aufwenden, ist exakt so groß, dass sie die Fliehkraft ausgleicht und wir uns in einer Kreisbahn mit dem Karussell bewegen. Die Rotation des Karussells verhindert zugleich, dass wir uns nach innen bewegen – es wäre ein enormer Kraftaufwand nötig, um uns dem Zentrum des Karussells zu nähern. Ganz ähnlich verhindert die Rotation in einer Scheibe, dass die Materie unter dem Einfluss der Gravitation nach innen fällt.

Rotierende Körper haben einen Drehimpuls. Diese Größe ist proportional zur Rotationsgeschwindigkeit und hängt von der Massenverteilung ab: Je weiter die Masse von der Achse entfernt ist, desto größer ist ihr Drehimpuls. Dieser ist wie die Energie eine Erhaltungsgröße: Er kann weder erschaffen noch zerstört werden. Wenn ein Eiskunstläufer eine Pirouette dreht, so kann er die Drehung beschleunigen, indem er die Arme anzieht. Denn da der Drehimpuls konstant bleiben muss, wird die Rotation der Masse, die sich nun näher an der

Drehachse befindet, durch Zunahme der Umdrehungsfrequenz ausgeglichen.

Die Erhaltung des Drehimpulses ist die Ursache dafür, dass es so viele Scheiben im Universum gibt. Betrachten wir eine Gaswolke, die sich unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenzieht. Da nahezu alles im Universum sich irgendwie in Rotation befindet, wird auch diese Wolke einen Drehimpuls haben. Wenn die Wolke nun kontrahiert, nimmt ihre Rotation wegen der Drehimpulserhaltung zu (Kasten links). Für die Materie in der Äquatorregion der Wolke – also in der Ebene senkrecht zur Rotationsachse – bildet die Fliehkraft der Rotation ein immer stärkeres Gegengewicht zur Gravitation. Entlang der Polachse, wo die Fliehkraft schwächer ist, fällt die Materie deshalb schneller zur Äquatorebene hinab. Das Resultat: eine durch Rotation stabilisierte Scheibe.

Die Wissenschaftler glauben, dass dieser Prozess die Entstehung protoplanetarer Scheiben um junge Sterne erklärt, und vielleicht sogar die Bildung der Scheiben um Schwarze Löcher in Galaxienzentren. Ob eine ganze Galaxie zu einer Scheibe wird, ist eine Frage des zeitlichen Ablaufs: Spiralgalaxien entstehen, wenn das Gas sich zuerst durch Rotation stabilisiert, bevor Gasklumpen zu einzelnen Sternen kontrahieren. Wenn aber zuerst Sterne entstehen, bevor die Gaswolke sich durch Rotation stabilisiert, dann bleiben die individuellen Umlaufbahnen der Sterne um das Galaxienzentrum erhalten und es bildet sich eine elliptische Galaxie. Im Allgemeinen entstehen Galaxien allerdings nicht isoliert. Galaktische Kollisionen und Verschmelzungen machen die Angelegenheit deshalb in der Realität erheblich komplizierter. Zumindest ein Teil der elliptischen Galaxien sowie die zentralen Verdickungen und die Halos von Spiralgalaxien könnten ihren Ursprung in solchen Zusammenstößen haben.

Akkretionsscheiben bilden sich auch in Doppelsternsystemen, wenn einer der beiden Partner (zum Beispiel ein kompakter, dichter Weißer Zwerg) mit seiner Schwerkraft dem anderen (üblicherweise ein größerer, weniger kompakter Stern) Gas entreißt. Diese Materie besitzt auf Grund seiner ursprünglichen Bewegung mit dem Stern auf seiner Umlaufbahn um den Massenschwerpunkt des Systems einen erheblichen Drehimpuls. Deshalb kann das Gas nicht direkt auf den Weißen Zwerg fallen, sondern sammelt sich zunächst in einer rotierenden Scheibe um ihn herum. So, wie der Planet Merkur in kürzerer Zeit – in nur 88 Tagen – um die Sonne läuft als die Erde, so rotiert die Materie im inneren Teil der Scheibe schneller als in den äußeren Bereichen.

Akkretion von Materie: gigantisches Kraftwerk im All

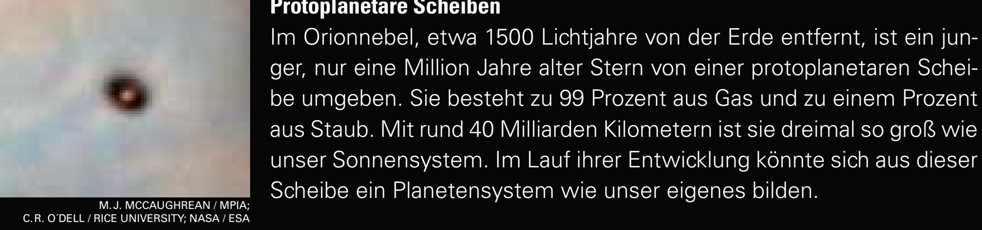
Dieser Gradient in der Umlaufzeit führt zu einer Scherung: Materieteile in geringfügig unterschiedlichen Entfernungen vom Scheibenzentrum gleiten aneinander vorbei (Kasten auf S. 48). Reibungseffekte innerhalb der Scheibe bremsen die schnelleren Materieteile ab und beschleunigen die langsameren. Dadurch wird Drehimpuls von innen nach außen transportiert. Als Folge davon kann die Rotation der Materie im inneren Teil der Scheibe die Gravitation nicht mehr vollständig ausgleichen – die Materie fällt nach innen. Insgesamt ergibt sich für die Scheibe eine spiralförmige Bewegung der Materie von außen nach innen auf den zentralen Stern oder das Schwarze Loch zu.

Während sich die Materie auf einer Spiralbahn nach innen bewegt, verliert sie im Schwerefeld an potenzieller Energie. Ein Teil davon wandelt sich in Bewegungsenergie um. Der Rest wird durch Reibung in Wärme oder andere Energieformen umgewandelt. Dadurch kann sich die Scheibenmaterie sehr stark aufheizen und große Mengen an thermischer Strahlung – im sichtbaren, ultravioletten und Röntgenbereich – aussenden. Diese Freisetzung von Energie macht aus Akkretionsscheiben eindrucksvolle Kraftwerke.

Dieses Phänomen hat die Astronomen überhaupt erst auf Schwarze Löcher aufmerksam gemacht. Denn diese merk- ▷

Scheiben und Jets in allen Größen

Überall im Universum sind die Astronomen auf Scheiben gestoßen – um junge Sterne in Nebeln unseres eigenen Milchstraßensystems und in Galaxienzentren, die Millionen Lichtjahre entfernt sind. Viele dieser Scheiben senden lange Teilchenstrahlen (Jets) aus. Wie es dazu kommt, lässt sich noch nicht überzeugend erklären.



M. J. MCCAUGHREAN / MPIA; C. R. O'DELL / RICE UNIVERSITY; NASA / ESA

Protoplanetare Scheiben
Im Orionnebel, etwa 1500 Lichtjahre von der Erde entfernt, ist ein junger, nur eine Million Jahre alter Stern von einer protoplanetaren Scheibe umgeben. Sie besteht zu 99 Prozent aus Gas und zu einem Prozent aus Staub. Mit rund 40 Milliarden Kilometern ist sie dreimal so groß wie unser Sonnensystem. Im Lauf ihrer Entwicklung könnte sich aus dieser Scheibe ein Planetensystem wie unser eigenes bilden.



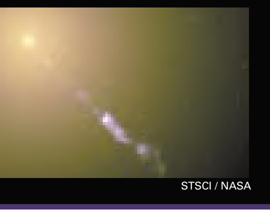
C. BURROWS, J. MORSE / STSCI / NASA; J. HESTER / ARIZONA STATE UNIVERSITY

Jet eines entstehenden Sterns
HH-30, ein sehr junger, 450 Lichtjahre entfernter Stern, ist ebenfalls in eine protoplanetare Scheibe eingebettet (auf deren Kante wir blicken). Zwei Jets (rot) strömen mit etwa 960 000 Kilometer pro Stunde in entgegengesetzten Richtungen aus dem Scheibenzentrum heraus. Möglicherweise wird das Gas durch das Magnetfeld des Sterns gebündelt.



M. REGAN ET AL. / STSCI / JPL / CALTECH / NASA

Spiralgalaxien
Die Spiralgalaxie NGC 7331, etwa fünfzig Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt, ist wie unser eigenes Milchstraßensystem scheibenförmig abgeplattet. Beobachtungen mit dem Spitzer-Weltraumteleskop, das im infraroten Wellenlängenbereich misst, weisen auf ein extrem massereiches Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie hin.

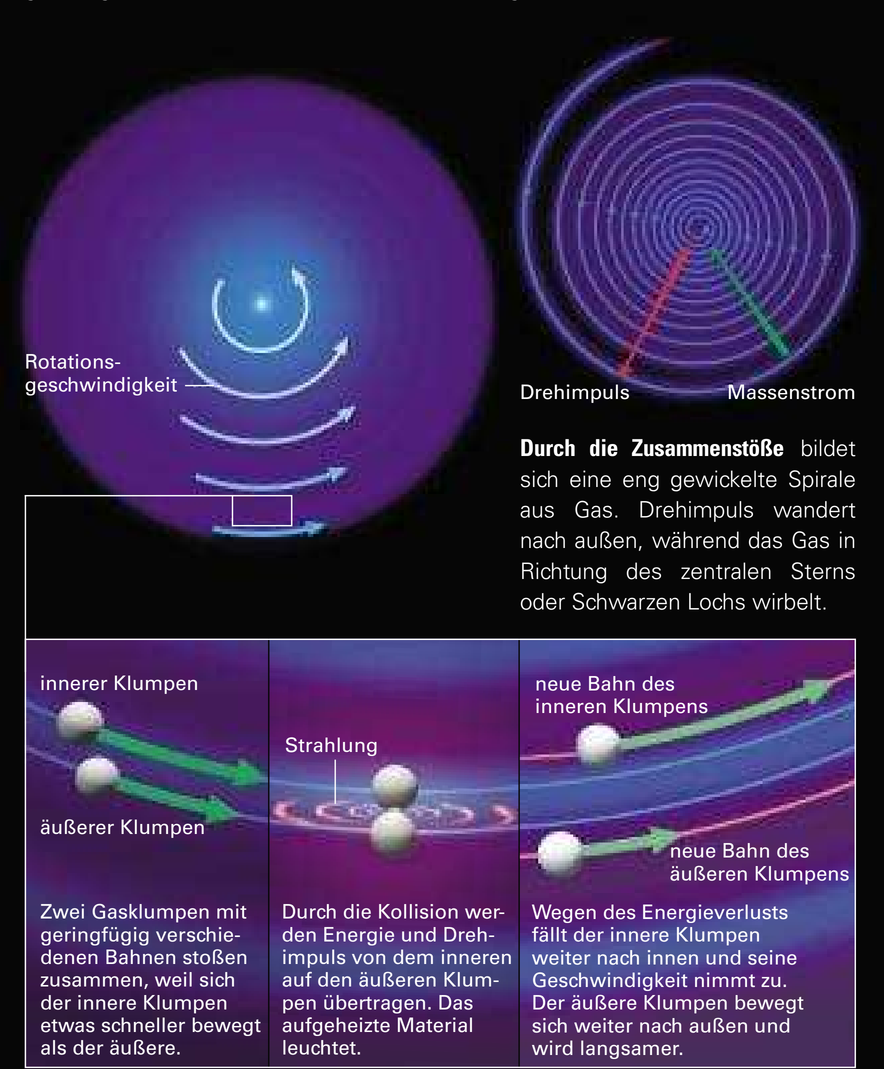


STSCI / NASA

Jet einer aktiven Galaxie
Der aktive Kern von M 87, einer etwa fünfzig Millionen Lichtjahre entfernten elliptischen Riesengalaxie, schleudert einen 6500 Lichtjahre langen Jet ultraschneller Elektronen aus. Die Energie stammt offenbar von einer Akkretionsscheibe, die sehr schnell um ein extrem massereiches Schwarzes Loch wirbelt.

Spiralbewegung und Strahlung

Materie in den inneren Bereichen einer Akkretionsscheibe läuft schneller um deren Zentrum als weiter außen strömendes Material (unten links). Dadurch gleiten radial benachbarte Materiebereiche aneinander vorbei. Ist die Strömung turbulent, stoßen einzelne Gasklumpen heftig zusammen (ganz unten). Dadurch wird Drehimpuls nach außen transportiert und das Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Schwerkraft gestört, sodass ein Teil der Materie auf einer Spiralbahn weiter nach innen sinkt. Da sich die Materie durch die Zusammenstöße stark aufheizt, strahlt die Scheibe große Energiemengen im sichtbaren, ultravioletten und Röntgenbereich ab.



Durch die Zusammenstöße bildet sich eine eng gewickelte Spirale aus Gas. Drehimpuls wandert nach außen, während das Gas in Richtung des zentralen Sterns oder Schwarzen Lochs wirbelt.

ALFRED T. KAMAJIAN

▷ würdigen Himmelskörper können selbst kein Licht aussenden, aber ihre Akkretionsscheiben können. (Diese allgemeine Aussage vernachlässigt die theoretische Hawking-Strahlung. Diese Emission wäre jedoch nur für sehr kleine Schwarze Löcher überhaupt nachweisbar und konnte bislang nirgends im Universum beobachtet werden.) Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zufolge sollte die von einer Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch abgestrahlte Energie etwa zehn Prozent der Ruhemasse des Materials entsprechen (gemäß der berühmten Formel $E = m \times c^2$ mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit multipliziert). Das ist eine unvorstellbar große Energiemenge, mehr als das Zehnfache der Energie, die durch thermonukleare Reaktionen in der Scheibenmaterie erzeugt werden könnte.

Doch die Vorhersage stimmt tatsächlich mit dem überein, was die Beobachtungen der so genannten Quasare zeigen. Quasare sind extrem leuchtkräftige Objekte, von denen die Astronomen vermuten, dass es sich bei ihren Energiequellen um strahlende Akkretionsscheiben um extrem massereiche Schwarze Löcher im Zentrum junger Galaxien handelt. Berechnet man die gesamte Energie, die im Verlauf der Zeit von allen Quasaren in einem bestimmten Volumen des Raums abgestrahlt wurde, so erhält man etwa zehn Prozent der Masse aller extrem massereichen Schwarzen Löcher, die man heute in dem entsprechenden Volumen beobachtet, multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

Sind Turbulenzen der Schlüssel zum Verständnis?

Was aber ist die wahre Natur der Reibung in den Akkretionsscheiben, die die Freisetzung dieser enormen Energiemengen auslöst? Eine Möglichkeit wäre, dass die Teilchen in der Scheibe miteinander kollidieren und dabei Energie und Drehimpuls austauschen. Diesen Mechanismus beobachten wir in den Saturnringen: Die Gesteinsbrocken und Staubkörnchen, aus denen die Ringe bestehen, stoßen zusammen, ihre Bewegungsenergie geht durch Aufheizung verloren und Drehimpuls wird nach außen transportiert. Gewöhnliche Flüssigkeiten verhalten sich ähnlich – tatsächlich lassen sich die Saturnringe als viskose Flüssigkeit beschreiben, in der die Moleküle die Rolle der kollidierenden Felsbrocken übernehmen. Die Zusammenstöße führen dazu, dass sich die Ringe nach außen auszubreiten suchen, doch die Monde des Saturns bilden eine Art Sammelbecken für den Drehimpuls und halten die Ringe zusammen.

Leider kann dieser einfache Prozess die Aktivität vieler anderer Arten von Akkretionsscheiben nicht erklären. In den Scheiben in Doppelsternsystemen oder in den Zentren von Galaxien würden die Zusammenstöße der Teilchen einen um viele Größenordnungen zu geringen Masseneinstrom erzeugen. Das würde nicht für die brillante Leuchtkraft dieser Scheiben ausreichen. Eine andere Ursache könnten großräumige Spiralwellen – ähnlich galaktischen Spiralarmen – in den Scheiben sein, die den Einfall der Materie beschleunigen. So wie Schallwellen Energie durch die Luft transportieren, können Spiralwellen sowohl Energie als auch Drehimpuls nach außen transportieren und so die Akkretion der

Materie nach innen erleichtern. Tatsächlich haben die Astronomen Hinweise auf Spiralwellen in den Akkretionsscheiben einiger Doppelsterne gefunden. Doch diese Wellen scheinen nicht groß genug zu sein, um den nötigen Materiefluss zu erzeugen, der zur Erklärung der beobachteten Strahlung nötig ist.

Viele Astronomen glauben deshalb, dass Turbulenz der häufigste Mechanismus für Reibung in den Akkretionsscheiben ist. Turbulenz könnte den Einfall der Materie beschleunigen, weil sie zu gewaltigen, großräumigen Kollisionen führt. Wenn Wasser durch ein Rohr fließt, sorgt die Viskosität der Flüssigkeit dafür, dass die Fließgeschwindigkeit im Zentrum der Röhre am größten, am Rand der Röhre dagegen am kleinsten ist. Erhöht man die Geschwindigkeit des Wassers, so wächst auch das Geschwindigkeitsgefälle und diese Scherung bewirkt schließlich eine Destabilisierung der Strömung: Sie wird turbulent und chaotisch. Da Akkretionsscheiben ebenfalls Strömungen mit sehr starken Scherungen enthalten, vermuteten einige Wissenschaftler schon in den 1970er Jahren, dass es in ihnen heftige Turbulenzen geben müsse. Doch als die Forscher versuchten, diese Turbulenzen in Computersimulationen mit Hilfe der grundlegenden Gleichungen der Strömungsdynamik zu erzeugen, blieben sie erfolglos: Es gab keinerlei Anzeichen für die Entstehung von Turbulenzen in Akkretionsscheiben.

Der Grund für dieses negative Ergebnis ist noch heute umstritten. Vielleicht waren die Computersimulationen fehlerhaft. Möglicherweise ist aber auch die simple Analogie mit der Flüssigkeitsströmung durch eine Röhre falsch, und rotierende Systeme wie die Akkretionsscheiben verhalten sich grundsätzlich anders. Einige Forscher haben in Laborexperimenten versucht, Turbulenzen in Strömungen nachzuweisen, die Akkretionsscheiben ähneln, doch auch die Ergebnisse dieser Versuche sind umstritten. Zwar konnte in einigen Fällen Turbulenz beobachtet werden, doch diese könnte auch durch Effekte verursacht werden, die es in echten Akkretionsscheiben nicht gibt.

Trotzdem halten die Astrophysiker an ihrer Überzeugung fest, dass Akkretionsscheiben turbulent sind. Sie stützen sich dabei auf eine 1973 von den russischen Physikern Nikolai Shakura und Rashid Sunjajew eingeführte, grobe mathematische Näherung für die Turbulenz in Scheiben. Auf diese Weise gelang es den Astrophysikern, den Gordischen Knoten zu durchschlagen und theoretische Modelle für Akkretionsscheiben zu entwickeln, die sich mit den Beobachtungsdaten der tatsächlichen Scheiben vergleichen ließen. Damit konnten die Forscher im Verlauf der Zeit einige Erfolge verbuchen. So durchlaufen beispielsweise die Akkretionsscheiben in Doppelsternsystemen gelegentlich große, vorübergehende Helligkeitsanstiege. (Zwerg-novae, Lichtausbrüche von Akkretionsscheiben um Weiße Zwerge in Doppelsternsystemen, sind ein Beispiel für dieses Phänomen.) Es gelang den Wissenschaftlern überzeugend zu zeigen, dass diese Ausbrüche durch Instabilitäten in der Scheibe ausgelöst werden, die zu einem schnellen Materiefluss nach innen führen.

Trotz dieser Erfolge hat der Ansatz von Shakura und Sunjajew aber letztlich nur unser Unwissen vertuscht. Die Unterschiede zwischen den Vorhersagen der Modelle und den Beobachtungsdaten könnten einfach dadurch zu Stande kommen, dass die von fast allen Forschern akzeptierten Annahmen über die Turbulenz in Scheiben falsch sind. Außerdem könnte die Turbulenz beobachtbare Folgen zeitigen, die über den Transport von Drehimpuls in der Scheibe hinausgeht – doch die Forscher können diese Folgen nicht voraussagen, solange sie die eigentliche Ursache nicht verstehen.

Eine astronomische Rennbahn

Glücklicherweise gelang 1991 ein spektakulärer Durchbruch beim Turbulenzproblem. Steven Balbus und John Hawley von der Universität von Virginia untersuchten damals das Verhalten von elektrisch leitender und magnetisierter Materie in einer Akkretionsscheibe. Selbst eine schwache Magnetisierung, so fanden sie heraus, kann in einer solchen Scheibe Strömungsinstabilitäten auslösen. Daraus resultieren dann unweigerlich turbulente Strömungen, die Drehimpuls nach außen transportieren und gravitative Bindungsenergie freisetzen. Die Astrophysiker glauben nun, dass diese »Magnetorotationsinstabilität« (MRI) eine zentrale Rolle bei der Energieerzeugung in Akkretionsscheiben spielt.

In einem elektrisch leitfähigen Medium müssen sich die magnetischen Feldlinien mit der Strömung der Materie mitbewegen. Zugleich aber üben die magnetischen Feldlinien eine Kraft auf die ▷

Instabilität in der Scheibe

Turbulenz in Akkretionsscheiben entsteht offenbar durch Magnetfelder. Die Feldlinien, die in geladenen Teilchen beginnen und enden, ziehen die Partikel wieder zusammen, falls diese auseinanderzudriften drohen. Aber falls das Magnetfeld nur schwach ist, kann es die Teilchen tatsächlich weiter auseinander treiben. Dieses Phänomen, die Magnetorotationsinstabilität, transportiert Masse nach innen und Drehimpuls nach außen. Ein Analogon sind zwei Teilchen, die durch eine schwache elastische Feder miteinander verbunden sind.



Betrachten wir zwei Teilchen in einer Umlaufbahn um die Erde. Ein zufälliger Zusammenstoß treibt eines der Partikel etwas näher an die Erde heran (wodurch es schneller wird), das andere etwas nach außen (dabei wird es langsamer).



Die elastische Feder versucht, die Partikel wieder zusammenzubringen. Die Spannung der Feder zieht das schnellere, innere Teilchen zurück und das langsamere, äußere nach vorne.



Da das innere Teilchen Energie verliert, fällt es noch tiefer und wird schneller. Das äußere steigt auf eine höhere Umlaufbahn und wird langsamer. Diese Instabilität führt zu einer turbulenten Strömung.

ALFRED T. KAMAJIAN

▷ Materie aus. Gummibändern gleich führen sie beispielsweise zu Spannungskräften, wenn sie verbogen oder gekrümmt werden.

Um den Effekt der magnetischen Feldlinien zu verstehen, stellen wir uns einmal zwei Teilchen vor, die durch ein elastisches Band miteinander verbunden sind und die Erde umkreisen (Kasten links). Wenn sich nun die beiden Teilchen ein wenig voneinander fortbewegen – also eins etwas näher an die Erde heran, eins etwas weiter von ihr fort –, dann würden wir zunächst erwarten, dass die Spannung des Bandes die beiden Teilchen an ihren ursprünglichen Ort zurückzieht. Wenn die Spannung jedoch ausreichend schwach ist, kann genau das Gegenteil passieren: Sie treibt die Teilchen weiter auseinander. Wegen der Erhaltung des Drehimpulses muss das nach innen bewegte Teilchen schneller, das nach außen bewegte langsamer werden. Das gedehnte Band jedoch versucht, das schnellere Teilchen abzubremsen und das langsamere zu beschleunigen. Dadurch aber verliert das innere Teilchen ein wenig Bewegungsenergie und fällt weiter nach innen (wobei es paradoxerweise schneller wird), während das äußere Teilchen weiter nach außen fliegt (wo es noch langsamer wird). Das Band transportiert also letztlich Drehimpuls vom inneren zum äußeren Teilchen. Ganz ähnlich wirken die magnetischen Feldlinien in einer Akkretionsscheibe aus elektrisch geladenen Teilchen.

Es ist leicht zu erkennen, wie diese Instabilität zu Turbulenz führt. Betrachten wir eine weitere Analogie: eine kreisförmige Rennbahn, auf der die Autos auf den inneren Bahnen schneller fahren als diejenigen auf den äußeren. Nehmen wir nun an, jemand habe die Autos auf unterschiedlichen Bahnen mit Ketten verbunden. Die Autos auf den inneren Bahnen würden Drehimpuls verlieren, da sie nach hinten gezogen würden, während die Autos auf den äußeren Bahnen nach vorne gezogen und so Drehimpuls gewinnen würden. Das Ergebnis: Chaos und Unfälle, ganz ähnlich der Turbulenz in einer Akkretionsscheibe.

Die Entdeckung der MRI hat unser Verständnis der Akkretionsscheiben revolutioniert. Die Situation ähnelt jener am Anfang des 20. Jahrhunderts, als die Astronomen begriffen, dass die primäre Energiequelle der Sterne Kernfusion in ihrem Innern ist. Nun haben die Astrophysiker den Mechanismus entdeckt, der noch größere Energiequellen antreibt, nämlich Quasare und aktive Galaxienkerne (von denen die Forscher ebenfalls glauben, dass sie durch den Einfall von Materie in extrem massereiche Schwarze Löcher angetrieben werden). Gegenwärtig versuchen die Forscher zu verstehen, wie die MRI-Turbulenz in unterschiedlichen physikalischen Situationen funktioniert. Sie hoffen so, die beobachteten Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Akkretionsscheiben erklären zu können.

Einige Wissenschaftler untersuchen beispielsweise, ob und wie MRI-Turbulenz in protoplanetaren Scheiben auftritt. Solche Scheiben sind viel kühler als jene um Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze Löcher, da die Zentralmasse viel kleiner ist. Deshalb bestehen die Scheiben hauptsächlich aus elektrisch neutralem Staub und Gas statt aus ionisiertem Plasma. Es ist noch völlig unklar, ob Magnetfelder die Strömung solcher Materie beeinflussen können.

Oszillationen und Plasmaströme

Meine eigene und auch andere Forschungsgruppen versuchen herauszufinden, wie die MRI in den heißen, undurchsichtigen Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher funktioniert. In diesen Scheiben können Turbulenzen leicht Überschallgeschwindigkeit erreichen und so zur Bildung von Stoßwellen aus geladenen Teilchen führen, ganz ähnlich wie Überschallflugzeuge einen Überschallknall erzeugen. Durch diese Bewegungen können Photonen eine hohe Energie erhalten, die es ihnen erlaubt, sich leichter durch die relativ transparenten Regionen zwischen den Stoßwellen zu bewegen. Deshalb erzeugt die MRI-Turbulenz charakteristische Strahlungsmuster, die dann für die Astronomen bei Schwarzen Löchern beobachtbar sein sollten.

Unter der Voraussetzung, dass viele Akkretionsscheiben turbulente Strömungen enthalten, ist es kaum verwunderlich, dass die Beobachtungen eine hochgradige Variabilität ihrer Strahlung zeigen. Die Variationen sind zumeist zufällig und chaotisch, doch gelegentlich zeigt sich eine Ordnung in dem Chaos. Wieder und wieder tauchen rätselhafte und unerklärliche Muster in der Strahlung auf (Bild auf S. 51). Manchmal beobachten wir auch Oszillationen mit

Merkwürdige Muster wurden in der Röntgenstrahlung der Akkretionsscheibe um GRS 1915+105 beobachtet. Die Scheibe umgibt ein Schwarzes Loch in einem Doppelsternsystem, das 40 000 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Bislang rätseln die Physiker noch über die Ursache dieser Oszillationen.

Röntgenphotonen pro Sekunde
40 000
20 000
0
0 1000 2000 3000
Zeit in Sekunden

ELIZA JEWETT, NACH: BELLONI ET AL., ASTRONOMY & ASTROPHYSICS (A&A), VOL. 355, 271-290, 2000

leidlich definierten Frequenzen. Der Rossi X-ray Timing Explorer, ein Satellit, der schnelle Veränderungen in der Röntgenhelligkeit eines Objekts messen kann, hat uns maßgeblich dabei geholfen, Oszillationen in Akkretionsscheiben um Neutronensterne und Schwarze Löcher mit Massen zwischen 4 und 15 Sonnenmassen zu untersuchen.

Die Astrophysiker wissen nicht, was die Ursache dieser Variabilitätsmuster und Oszillationen ist. Eine aufregende Möglichkeit, vorgeschlagen von Robert Wagoner von der Stanford-Universität und anderen, ist, dass die Oszillationen diskrete Schwingungsmoden der Scheibe widerspiegeln – vergleichbar den harmonischen Schwingungen einer Geigensaite. Und wie die Töne dieser Saite etwas über deren Spannung und Masse verraten, können uns die beobachteten Frequenzen einer Akkretionsscheibe etwas über deren Struktur und die Raumzeit um einen Neutronenstern oder Schwarzen Lochs erzählen.

Wenngleich ein Großteil der gravitativen Bindungsenergie des herabspiralenden Materials in der Akkretionsscheibe in Strahlung umgewandelt wird, treibt sie in manchen Fällen Teilchenwinde und Jets aus der Scheibe (Kasten auf S. 47). Die Astronomen versuchen herauszufinden, wie solche Materieausflüsse entstehen und wovon die Aufteilung der freigesetzten Energie in Strahlung und Bewegungsenergie abhängt. Vermutlich wirken für verschiedene Scheibenarten unterschiedliche Erzeugungsmechanismen für den Teilchenausstoß. In einigen Fällen kontrollieren die Strömungen die Akkretionsscheiben, weil sie nicht nur Masse und Energie hinausbefördern, sondern vielleicht auch beträchtliche Mengen an Drehimpuls.

Ein möglicher Antriebsmechanismus für einige Arten von Ausflüssen ist der Strahlungsdruck der in der Akkretionsscheibe erzeugten Photonen. Auch wenn diese Lichtquanten keine Ruhemasse haben, tragen sie doch einen Impuls. Wenn Photonen an Materie gestreut werden, dann tauschen sie deshalb Impuls mit den getroffenen Teilchen aus und üben dadurch eine Kraft auf sie aus. (Nach diesem Prinzip funktionieren Sonnensegel.) Von jungen, massereichen Sternen abgestrahlte ultraviolette Photonen erzeugen durch ihre Streuung an Atomen und Ionen in der Umgebung des Sterns starke Teilchenwinde. Ganz ähnlich könnten ultraviolette Photonen von Akkretionsscheiben um Weiße Zwerge, aktive Galaxienkerne und Quasare Winde erzeugen.

Was ist die Ursache der Materieschleuder?

Einige Systeme, zum Beispiel junge Sterne und bestimmte Klassen von aktiven Galaxienkernen, erzeugen sehr schnelle, schmale Ströme geladener Teilchen. Solche Plasmaströme oder Jets können bei jungen Sternen viele Lichtjahre lang sein, bei aktiven Galaxienkernen sogar viele Millionen Lichtjahre. Die enge Bündelung über diese Distanzen deutet darauf hin, dass Magnetfelder involviert sind. (Einen weiteren Hinweis auf deren Existenz lieferte den Astronomen die Polarisation von Radiowellen.)

Wenn die Akkretionsscheibe selbst magnetisiert ist, dann werden durch ihre Rotation die Magnetfeldlinien zu Spiralen aufgewickelt. Die dadurch erzeugte Spannung in den verdrillten Feldlinien hilft dann dabei, den Materiestrom zu bündeln. In den 1980er Jahren schlugen Roger Blandford und David Payne vom California Institute of Technology vor, dass die Rotation der Scheibe auch dazu beitrage, Materie entlang der Feldlinien herauszuschleudern. Die Rotation, so meinten sie, könnte die Anfangsbeschleunigung für die Plasmaströme liefern. Leider ist es uns bis heute nicht gelungen, einen Zusammenhang zwischen dem nach innen gerichteten Fluss in der Scheibe und seiner komplexen MRI-Turbulenz auf der einen Seite sowie der scheinbar wesentlich stärker geordneten Feldstruktur in den nach außen gerichteten Plasmaströmen auf der anderen Seite herzustellen. Doch vielleicht helfen uns die raschen Fortschritte, die wir bei der Untersuchung der Magnetfelder in Akkretionsscheiben machen, dabei, dieses Problem zu lösen.

Seit Jahrzehnten versuchen nun schon Astrophysiker zu verstehen, wie Akkretionsscheiben funktionieren. Wir glauben heute, ein grundlegendes Verständnis dieser Systeme erlangt zu haben. Mit unserer Untersuchung der magnetischen Turbulenz in unterschiedlichen Umgebungen hoffen wir eines Tages, die bemerkenswerte Vielfalt dieser Materiewirbel zu verstehen. Auch unser Sonnensystem ist aus einer Akkretionsscheibe entstanden. Die Entschlüsselung der Geheimnisse dieser faszinierenden Objekte könnte also auch die Frage beantworten, woher wir kommen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Omer Blaes ist Physikprofessor an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara. Nach seiner Promotion im Jahr 1985 an der International School for Advanced Studies in Triest (Italien) forschte er am California Institute of Technology und dem Canadian Institute for Theoretical Astrophysics in Toronto. Zu den Interessen des Theoretikers gehören neben den Akkretionsscheiben kompakte Objekte wie Schwarze Löcher, Neutronensterne und Weiße Zwerge.

Schwarze Löcher im Kosmos. Von M. Begelman und M. J. Rees. Spektrum Verlag, 2000

Accretion Processes in Star Formation. Von Lee Hartmann. Cambridge University Press, 2004

Accretion Power in Astrophysics. Von Juhan Frank, Andrew King und Derek Raine, Cambridge University Press, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ein See als Seismograf

Die Schweiz gilt nicht gerade als erdbebengefährdet. Doch wurde sie in der Vergangenheit von starken seismischen Erschütterungen heimgesucht. Das verraten Sedimente am Boden des Vierwaldstättersees.

Von Michael Schnellmann, Flavio S. Anselmetti, Domenico Giardini, Judith A. McKenzie und Steven N. Ward

Zinstags den 18 tag Septembris dess 1601ten jars erhuobe sich nach mittnacht den morgen gegen tag ein wenig vor 2 vhren ein starcker vnd fürwar erschrockenlicher erdbidem allhie by vns zuo Lucern, ... derglychen nitt allein sich niemands verdencken mögen, sonder ouch jn allten historien vnd chronicken nitt ze finden, das die statt Lucern derglychen überstanden habe ....« So beginnt der Augenzeugenbericht von Renward Cysat, Stadtschreiber in Luzern, der die katastrophalen Auswirkungen eines der stärksten bekannten Erdbeben in Mitteleuropa eingehend dokumentierte. Der Erdstoß verursachte beträchtliche Schäden in der Zentralschweiz und war noch in Teilen Frankreichs, Deutschlands und Italiens spürbar. Seismologen schätzen, dass er die Stärke 6,2 auf der Richterskala erreicht hätte, wenn er von modernen Instrumenten aufgezeichnet worden wäre. Damit nähme er den gleichen Rang ein wie viele starke Erdbeben, die sich in jüngerer Zeit bei Los Angeles und San Francisco ereignet haben.

Die Kalifornier sind es natürlich gewöhnt, dass der Boden ab und zu wackelt. Doch wer kann sich schon ernsthaft vorstellen, dass Erdbeben die Schweiz bedrohen? Die Eidgenossen ergreifen vielerlei Vorkehrungen gegen Bergstürze und Hochwässer; mit größeren seismischen Erschütterungen rechnen sie hingegen kaum. Wenn man aber genügend weit zurück in den historischen Berichten blättert, stellt man fest, dass es in der Schweiz tatsächlich einige starke Erdstöße gab. Außer dem von 1601 bei Luzern ereignete sich 1356 ein verheerendes Beben bei Basel. Es war das stärkste jemals in Mitteleuropa beobachtete.

Ein ähnliches Ereignis heute würde zahlreiche Tote und Verletzte fordern sowie großräumig erhebliche Zerstörungen anrichten. Um zu entscheiden, wie viel Zeit und Geld in Vorsorgemaßnahmen gegen Erdbeben fließen sollten, muss man jedoch wissen, wie groß die Gefahr wirklich ist. Deshalb arbeiten wir daran, die seismischen Risiken für die Schweiz besser abzuschätzen. Zunächst einmal gilt es dabei herauszufinden, in welchen Abständen starke seismische Erschütterungen im Mittel auftreten.

Noch bis vor Kurzem basierte der Schweizer Katalog vergangener Erdbeben ausschließlich auf seismografischen Messungen und historischen Dokumenten. Der erste Seismograf in der Eidgenossenschaft wurde 1911 installiert, und die schriftlichen Aufzeichnungen decken nur das letzte Jahrtausend ab. Anhand dieser beiden Informationsquellen, so wertvoll sie sind, lässt sich daher nicht erkennen, ob irgendwo starke Erdstöße im Abstand von, sagen wir, einigen tausend Jahren auftreten. Solche langen Intervalle zwischen großen Beben sind ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

LUFTBILD SCHWEIZ

Im Bergland um den Vierwaldstättersee sind Lawinen, Hangrutschungen und Bergstürze bekannte Naturgefahren. Gelegentlich haben aber auch starke Erdbeben diese Region heimgesucht. Eines fand 1601 statt und verursachte große Schäden in Luzern (im Vordergrund) und der gesamten Zentralschweiz. Die Ablagerungen des Sees erwiesen sich nun als natürliches Archiv, in dem vier weitere starke Beben verzeichnet sind, die in den vergangenen 15 000 Jahre stattfanden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

aber typisch für Regionen wie die Schweiz, die weitab von den Rändern tektonischer Platten liegen, wo sich ein Großteil der seismischen Aktivität abspielt.

Um das Risiko starker Erdbeben in solchen Gebieten zu ermitteln, muss man möglichst weit in die Vergangenheit zurückschauen und den Katalog der bekannten Ereignisse bis ins Dunkel der Vorgeschichte ausdehnen. Zwar ist von damals natürlich kein schriftlicher Erdbebenbericht überliefert, doch die Erschütterungen haben in der Natur selbst Spuren hinterlassen. Man muss die versteckten geologischen Archive nur aufspüren und richtig deuten, um Informationen über Erdstöße in ferner Vergangenheit zu gewinnen.

Paläoseismologen haben sich auf diese Detektivarbeit spezialisiert. Um die charakteristischen Spuren zu entdecken, die mittlere bis starke seismische Erschütterungen an der Erdoberfläche oder unmittelbar darunter hinterlassen haben, ziehen sie regelmäßig Gräben quer durch aktive Störungen im Boden, an denen bei früheren Beben Verwerfungen stattgefunden haben. Dabei können sie feststellen, wie weit die benachbarten Schichten gegeneinander verschoben wurden und wann das geschah.

In Gebieten, die weit von Plattengrenzen entfernt liegen, funktioniert diese Methode allerdings nicht sehr gut; denn dort sind Brüche an der Oberfläche selten und schwierig auszumachen. Hier sucht man besser nach Zeugnissen der Erschütterung statt nach dem ursächlichen Bruch.

Zum Glück für die Paläoseismologen gibt es viele Sekundäreffekte, wenn die Erde bebt: Stalaktiten in Höhlen können abbrechen, frei stehende Felsblöcke umkippen, steile Hänge ins Rutschen geraten und sandige Böden wie eine Flüssigkeit fließen. Für manche dieser Vorkommnisse sind aber auch andere Ursachen denkbar. So kann ein Stalaktit unter seinem eigenen Gewicht abbrechen oder Starkregen einen Erdrutsch auslösen. Hauptaufgabe der Paläoseismologen ist es darum, die Zeichen richtig zu deuten und alternative Erklärungen auszuschließen. Sobald ein seismisches Ereignis dann als Ursache feststeht, ist der nächste Schritt, die von ihm hinterlassenen Strukturen zu datieren.

Archiv im Untergrund

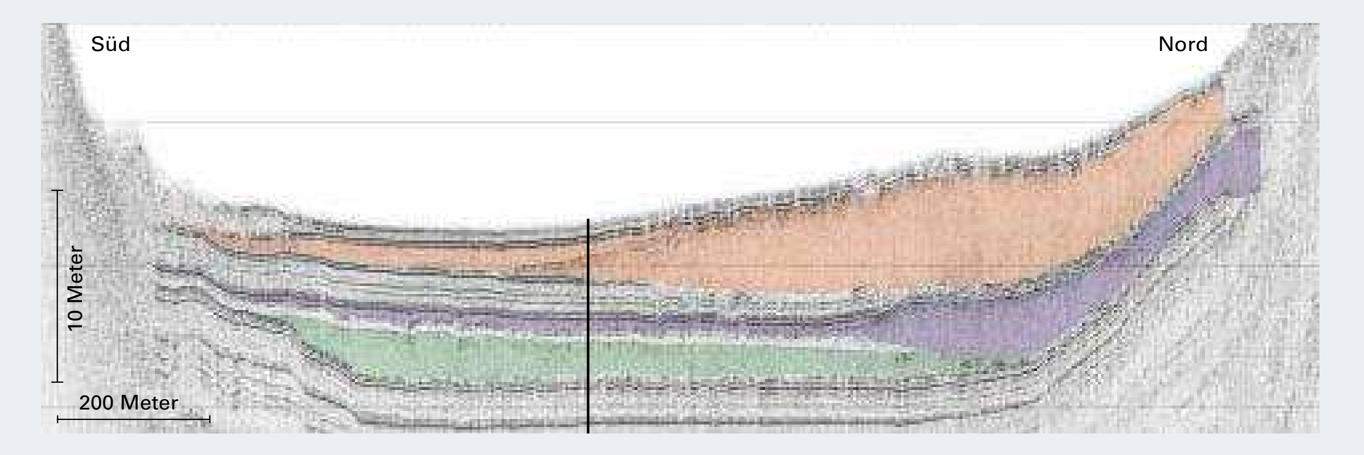
Geologen sind sich einig, dass die Ablagerungen am Boden stehender Gewässer eine Fundgrube für Informationen über Umweltbedingungen in der Vergangenheit sind. Glücklicherweise ist die Schweiz für ihre vielen malerischen Seen bekannt. Darin setzen sich kontinuierlich, Jahr für Jahr, Schwebstoffe und andere Sedimente ab. Sie bilden ein vollständiges und oft äußerst detailliertes Archiv der Ereignisse seit der Entstehung des Gewässers.

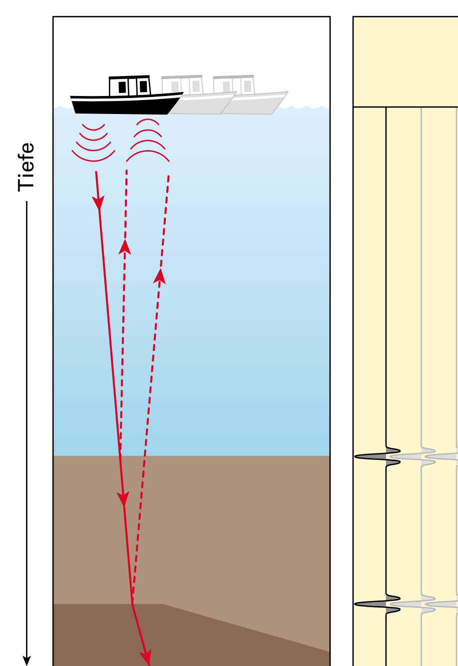
In den von uns untersuchten Bereichen des Vierwaldstättersees häuft sich etwas weniger als ein Millimeter Sediment pro Jahr an – und das seit etwa 15 000 Jahren, als sich gegen Ende der Eiszeit die Gletscher zurückzogen. Die Zusammensetzung des Materials spiegelt in hohem Maße die örtlichen Bedingungen zur Zeit der Ablagerung wider. Zum Beispiel setzen sich Pollen, die in den See geweht wurden, am schlammigen Boden ab und dokumentieren so Änderungen der Vegetation im Umland. Grobkörnige Schichten zeugen dagegen von Zeiten, als Hochwässer sandigen Gesteinsschutt heranschwemmten.

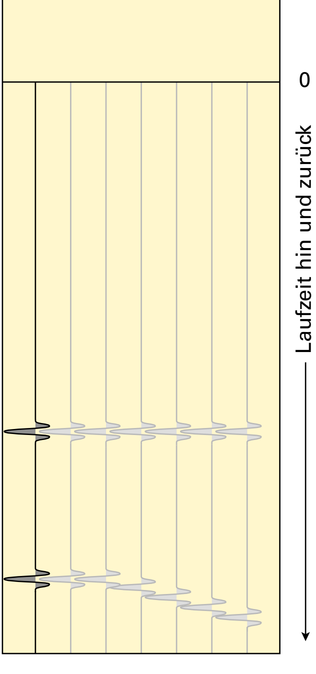
Auch Erdbeben können bleibende Spuren am Grund von Seen – oder Ozeanen – hinterlassen; denn die Erschütterung des Bodens bewirkt oft, dass sich an Unterwasserhängen Sedimente lösen und lawinenartig abrutschen. Das berühmteste Beispiel ist wahrscheinlich das Grand-Banks-Erdbeben aus dem Jahre 1929. Es hatte eine Stärke von 7,2 auf der Richterskala und verursachte eine gewaltige Rutschung am Meeresgrund vor Neufundland. Der plötzlich den Kontinentalhang hinabgleitende Sedimentstrom – eine gewaltige, breiige Schlammwalze – zerriss

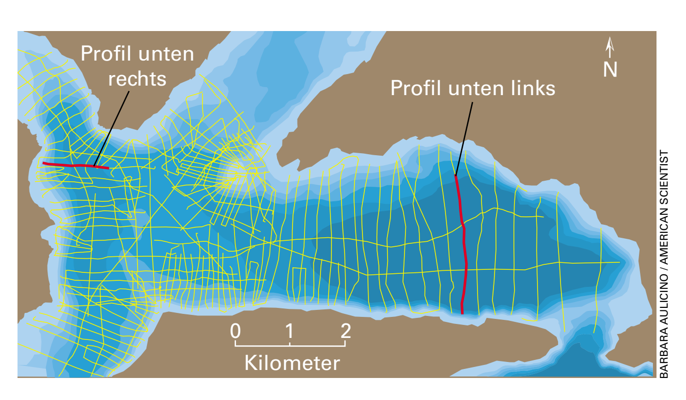
Durchleuchtung des Seebodens

Bestimmte Ablagerungen (farbige Flächen) in diesen reflexionsseismischen Profilen (Positionen siehe Zeichnung rechts oben) zeugen von Rutschungen an Abhängen am Seeboden. Ihr Erscheinungsbild ähnelt dem Rauschen auf einem gestörten Fernsehschirm und hebt sich deutlich von dem der umgebenden, geschichteten Sedimente ab, die ein Muster aus streng parallelen hellen und dunklen Streifen bilden. Nur ein einziges Erdbeben hat in beiden Profilen zugleich Spuren hinterlassen (violette Flächen), und ein Rutschkörper (grüne Fläche) stammt vermutlich nicht von einem Erdstoß. Die schwarze senkrechte Linie im Diagramm unten zeigt an, wo ein Bohrkern zur Datierung der weggebrochenen Sedimente gezogen wurde.







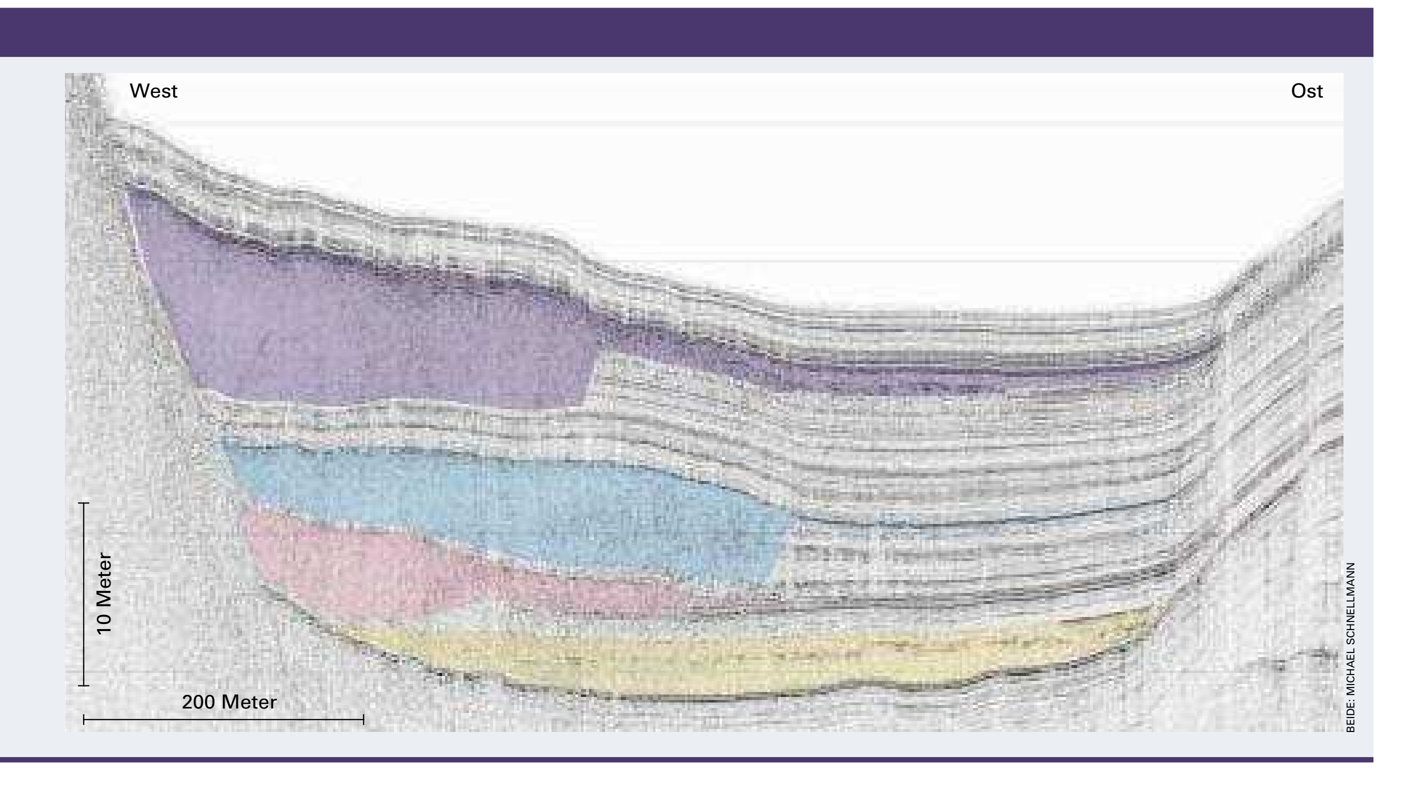


Mit reflexionsseismischen Messungen durchleuchteten die Autoren den Boden des Vierwaldstättersees. Dabei sendete ein akustischer Wandler, der am Rumpf eines sich langsam bewegenden Forschungsboots befestigt war, in regelmäßigen Abständen Schallsignale aus und registrierte die Echos von den diversen Schichten im Boden (ganz links). Daraus ließ sich ein Abbild der inneren Struktur der Sedimente am Seegrund gewinnen (links). Auf diese Weise legten die Autoren über den Westteil des Sees ein dichtes Netz seismischer Profile mit einer Gesamtlänge von etwa 300 Kilometern (oben).

nacheinander mehrere untermeerische Telefonkabel und unterbrach so Teile der transatlantischen Kommunikation.

In Kenntnis solcher Ereignisse vermuteten wir, dass auch die Sedimente am Boden Schweizer Seen Spuren einstiger seismischer Erschütterungen bergen sollten. Für die Probe aufs Exempel wählten wir den Vierwaldstättersee, der in Cysats Bericht über das Erdbeben von 1601 eine so große Rolle spielt. Es kostete uns eine Menge Gelände- und Laborarbeit, die Tiefen dieses Gewässers im Detail zu ergründen. Doch als Ergebnis konnten wir schließlich am Seegrund die Spuren des Erdbebens von 1601 und vier bisher unbekannter prähistorischer Erdbeben dokumentieren.

Bei der Ausarbeitung unseres Forschungsprogramms war Cysats Bericht von unschätzbarem Wert. Am Morgen nach dem Erdbeben ritt er zusammen mit weiteren Würdenträgern der Stadt am Seeufer entlang, um den Schaden zu begutachten. In bewegten Worten beschrieb er das allgemeinen Durcheinander (in hochdeutscher Übertragung): »Wir sahen Schiffe, Bauholz, Planken, Schilfrohre und anderes Material, das nicht nur im See schwamm, sondern auch fünfzig Schritte von der normalen Wasserlinie entfernt und bis zu zwei Hellebarden [drei bis vier Meter] hoch ans Gestade geworfen worden war … Näher bei der Stadt beobachteten wir Leute, die ans Ufer gespülte Fische auflasen … In Luzern waren die Schiffe vom Pier gerissen und ohne Menschenhand, Wind, Ruder oder Segel weit in den See hinausgetrieben worden … Die Reuss [der Abfluss des Vierwaldstättersees] floss sechsmal in der Stunde vor und zurück.« ▷



▷ Cysat notierte weiter, dass das Wasser aus dem Fluss, der die Stadt in zwei Hälften teilt, mehrfach fast vollständig verschwand, so »das man (allso ze reden) schier trochens fuosses von dem büchsenhuss zuo den mülinen herüber hette gan mögen, wie es dann ettliche junge lüt zur gedächtnuss söllent gethan haben«. Außerdem seien Erhebungen am Seeboden, die man bei niedrigem Wasserstand sehen und mit Stangen erreichen konnte, auseinander gerissen und in die Tiefe gezogen worden. Wiesenstücke befänden sich mehr als einen Steinwurf weit von ihrer ursprünglichen Position entfernt, und tiefe Spalten hätten sich im Boden aufgetan.

Dieser Bericht bestärkte uns in der Annahme, dass die dramatischen Ereignisse bleibende Spuren auf dem Boden des Sees hinterlassen haben müssten. Wir waren dessen sogar ziemlich sicher, weil zu Beginn der 1980er Jahre Mitglieder des Limnogeologie-Labors an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich zwei große Rutschkörper am Boden des Sees entdeckt hatten – die Folge von Unterwasser-Schlammlawinen, als deren Ursache die Forscher das Erdbeben von 1601 vermuteten.

Schon bald nachdem eine von uns (McKenzie) im Jahr 1996 das Limnogeologie-Labor übernommen hatte, verfolgten sie und ein anderer Autor (Anselmetti) diese Spur weiter. Dabei fanden sie im Vierwaldstättersee zahlreiche Ablagerungen von Schlammlawinen, viele davon tiefer und damit älter als die von 1601. Die tiefsten reichten offenbar bis weit in die vorgeschichtliche Zeit zurück. Wenn man also durch Erdbeben ausgelöste Rutschungen von solchen unterscheiden könnte, die andere Ursachen hatten, sollten diese alten Seesedimente die regionale Geschichte schwerer seismischer Erschütterungen in den vergangenen 15 000 Jahren erzählen.

Zur selben Zeit suchte ein anderer von uns (Giardini), Direktor des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED), nach genau einem solchen langfristigen Erdbebenkatalog. Da es zu seinen Aufgaben gehörte, das Erdbebenrisiko für das Alpenland einzuschätzen, wollte er wissen, wo, wann und wie oft dort starke seismische Erschütterungen stattgefunden hatten. Als Anselmetti ihm von den Funden im Vierwaldstättersee berichtete, erkannte Giardini darin sogleich mögliche Zeugen bislang unbekannter Erdbeben in der fernen Vergangenheit der Zentralschweiz. Damit begann eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Schweizerischen Erdbebendienst und dem Limnogeologie-Labor der ETH Zürich.

Nachdem McKenzie, Anselmetti und Giardini Ziel und Strategie ihres Forschungsprojekts ausgearbeitet hatten, mussten sie nur noch einen Doktoranden finden, von dem sie hofften, dass er die Hauptarbeit verrichten würde. So wandten sie sich an einen weiteren von uns (Schnellmann), der gerade von einem Praktikum in einer türkischen Borax-Mine zurückgekehrt war. Anselmetti überzeugte ihn während einer Schifffahrt über den Vierwaldstättersee, mit ins Boot zu kommen und zu helfen, die Geheimnisse in den Tiefen des Sees zu lüften. Die Aussicht, die kommenden Jahre damit zu verbringen, auf dem malerischen Vierwaldstättersee zu schippern, anstatt Staub in einer weit entfernten Borax-Mine einzuatmen, machte Schnellmann die Entscheidung letztlich leicht.

◀ **Das Foto der aneinander gereihten Stücke eines Bohrkerns (rechts) und das zugehörige reflexionsseismische Profil stimmen gut überein. Der Bohrkern bestätigt also die Interpretation der seismischen Ergebnisse. Zudem lieferte er organisches Material für die Datierung. Die eingefärbten Schichten gehören zu Rutschungen von 1601 n. Chr., 470 v. Chr. und 1290 v. Chr. Letztere wurde vermutlich nicht von einem Erdstoß ausgelöst.**

Dichtes Netz seismischer Profile

Im Juni 2001 überführten Schnellmann und Anselmetti also das Forschungsboot MS Tethys der ETH Zürich zum Vierwaldstättersee und begannen mit der reflexionsseismischen Untersuchung der Bodensedimente. Diese Methode ähnelt der in der Medizin angewandten Sonografie: Genau wie Ärzte per Ultraschall einen Blick in den menschlichen Körper werfen, können Geologen die innere Struktur der Sedimente am Grund des Sees sichtbar machen, indem sie Schallwellen von der Oberfläche hinabsenden und das schwache Echo aufzeichnen, das wenig später zurückkommt.

In diesem Fall ist der akustische Wandler (der wie ein Lautsprecher und ein Mikrofon in einem funktioniert) am Bootsrumpf angebracht, von wo er ein Schallsignal ins Wasser sendet. Es wird vom Seeboden und von den unterschiedlichen Sedimentschichten im Untergrund jeweils partiell zurückgeworfen. Diese Echos enthalten folglich Informationen über die Struktur der Ablagerungen. Sie werden von demselben akustischen Wandler aufgefangen und an Bord des Forschungsboots gespeichert. Zurück im Labor lässt sich daraus dann ein quasidreidimensionales Bild von den Sedimenten am Boden ableiten.

Während vieler Tage auf dem Schiff erfassten wir reflexionsseismische Daten über eine Gesamtstrecke von mehr als

300 Kilometern. Der Vierwaldstättersee besteht aus mehreren Becken. Mit einem Zickzackkurs legten wir ein dichtes Netz seismischer Profile über einige davon. Solche mit angrenzenden Flussdeltas ließen wir absichtlich aus, weil dort, wie wir wussten, wegen der hohen Geschiebefracht der Flüsse Rutschungen vorkommen, die nichts mit Erdbeben zu tun haben.

Am Ende wurden wir für die Mühe reichlich belohnt: Bei der akribischen Sichtung unserer Aufnahmen entdeckten wir viele Belege für Bodenbewegungen unter Wasser – seien es Abrissnarben an Hängen, die anzeigten, wo große Materialmengen weggebrochen waren, oder lawinenkegelartige Ablagerungen am Fuß der Abhänge, wo sich die abgerutschten Schlammmassen angesammelt hatten. Solche Akkumulationen sind in den seismischen Profilen leicht erkennbar, weil normale, ungestörte Seesedimente eine klare horizontale Schichtung aufweisen, während die stark deformierten und zerscherten Rutschkörper als chaotische Bereiche erscheinen, ähnlich dem Rauschen auf einem Fernsehschirm, wenn man das Antennenkabel herauszieht.

Da wir Dutzende eng benachbarter Profile zur Hand hatten, war es leicht, auffällige Schichten zu verfolgen und die Ausmaße der Schuttkegel von einzelnen Hangrutschungen über den von uns aufgenommenen Abschnitt des Gewässers hinweg zu ermitteln. Dabei erkannten wir, dass sich viele der von uns entdeckten Ablagerungen in genau demselben Niveau befanden wie diejenigen, die das frühere Forscherteam der ETH Zürich schon gefunden und mit dem Erdbeben von 1601 in Verbindung gebracht hatte.

Tatsächlich enthält der Horizont, der diesem Ereignis entspricht, mindestens dreizehn ausgedehnte Schuttkegel. Das damalige Beben löste demnach überall im See Schlammlawinen aus. Außerdem stellten wir fest, dass im Zentrum zweier deutlich voneinander getrennter Teilbecken direkt auf den Rutschkörpern jeweils eine bis zu zwei Meter dicke Schicht aus homogenem Schlamm lagert. Sie besteht zweifelsohne aus Material, das durch die Rutschungen und damit verbundenen Wasserbewegungen aufgewirbelt wurde und sich schließlich im tiefsten Teil der Becken absetzte.

Spuren prähistorischer Erdbeben

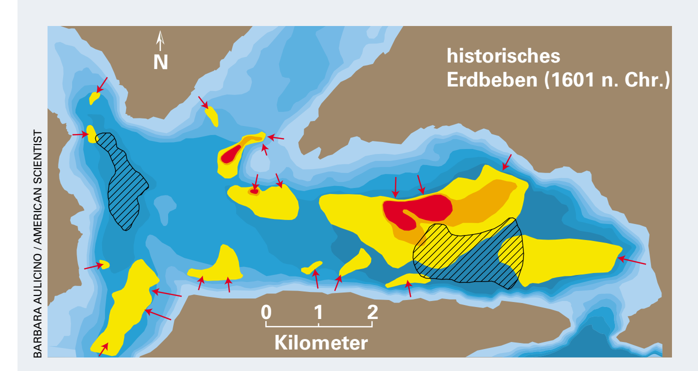
Wir waren sicher, dass vorgeschichtliche Erdbeben gleicher oder größerer Stärke als das von 1601 ähnliche Ablagerungen hinterlassen haben müssten. Deshalb suchten wir die seismischen Profile gezielt danach ab. Schon bald entdeckten wir etwa drei Meter unter dem Seeboden einen Horizont, der insgesamt sechzehn Rutschkörper enthält. Auch diese sind in drei verschiedenen Subbecken von mächtigen, homogenen Schlammpaketen bedeckt. Allem Anschein nach hatten wir die Hinterlassenschaft eines starken prähistorischen Erdbebens vor uns.

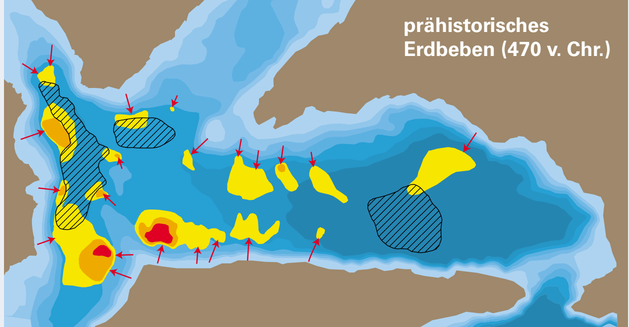
Zunächst blieben zwar leise Zweifel, ob es nicht vielleicht doch eine banalere Erklärung für all diese Rutschungen gäbe. Dann aber machten wir eine Beobachtung, die uns zuversichtlich stimmte, dass ausschließlich ein Erdbeben als Auslöser in Frage kam: Überreste dieser alten Schlammrutschungen fanden sich nicht allein am Fuß der ufernahen Böschungen, sondern auch in der Nähe zweier Erhebungen im Wasser, von denen eine nur bis etwa 85 Meter unter dem Seespiegel reicht. Man kann sich zur Not vorstellen, dass gewöhnlichere Ereignisse wie hoher Wellengang im sturmgepeitschten See oder größere Überschwemmungen Rutschungen am Rand des Gewässers auslösen. Doch Hänge am Seegrund weitab vom Ufer und 85 Meter tief unter Wasser würden dadurch nicht instabil.

Die weitere Analyse unserer seismischen Profile ergab rasch Hinweise auf drei weitere prähistorische Beben einer Stärke, die ausreichte, Mehrfachrutschungen auszulösen. Doch wie heftig waren diese Erdstöße wirklich? Das blieb schwierig zu beantworten. Zwar möchte man intuitiv annehmen, dass sich die Stärke eines Bebens daraus ablesen lässt, wie viel Sediment verlagert wurde. Dagegen spricht jedoch ein irritierender Befund: Der größte Rutschkörper, auf den wir bei unseren Untersuchungen stießen, muss trotz der etwa 17 Millionen Kubikmeter Schlamm, die er enthält, bei einem sehr schwachen Erdstoß entstanden sein – oder vielleicht eine völlig andere Ursache gehabt haben. Diese gewaltige Rutschung war nämlich ein singuläres Ereignis; nirgendwo im See fand sich im selben Niveau ein Gegenstück. ▷

Rutschungen unter Wasser

Beim historischen Erdbeben von 1601 (links) bildeten sich viele Rutschkörper, deren Mächtigkeit von weniger als fünf (gelb) bis hin zu mehr als zehn Metern (rot) reichte. In den tiefsten Abschnitten des Sees sind sie von einer dicken Schlammschicht bedeckt (Schraffur) – aufgewühltes Material, das sich absetzte, nachdem der See sich wieder beruhigt hatte. Eine ähnliche, aber ältere Serie von Sedimenten (rechts) zeugt von einem prähistorischen Beben, das gleichfalls Rutschkörper am Fuß diverser Unterwasserhänge hinterließ (Pfeile) – darunter einige an Erhebungen, die weit vom Ufer entfernt liegen.



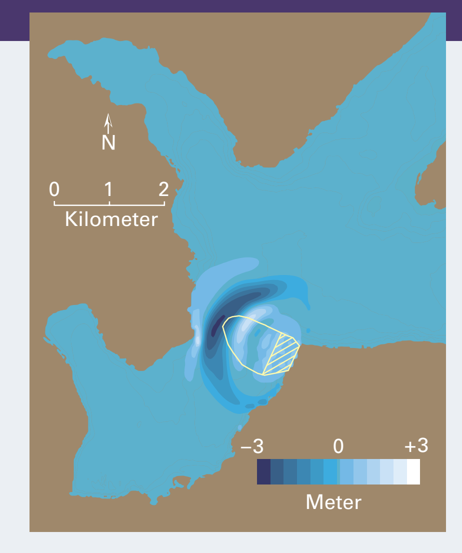


Simulation der Tsunamiwellen

Für einen Abbruch am Seeufer (schraffierter Bereich) und den daraus resultierenden Rutschkörper (gelbe Umrisslinie), der beim Erdbeben 470 v. Chr. entstand, simulierten die Autoren im Computermodell die resultierende tsunamiartige Woge. Diese weist im Unterschied zu normalen, vom Wind aufgeworfenen Wellen die enorme Wellenlänge von fast einem Kilometer auf und ist sehr hoch: Eine Minute nach dem Abbrechen des Seeufers beträgt die Amplitude fast drei Meter (links).

In dieser Zeit hat die Welle bereits ungefähr zwei Kilometer zurückgelegt – was der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen in der Schweiz entspricht – und sich in zwei der Arme des Vierwaldstättersees hinein ausgebreitet (Mitte). Drei Minuten nach dem simulierten Beginn beschränkt sich der größte Teil der Unruhe dann auf den Nordwestrand des Gewässers (rechts).

In Wirklichkeit müssen die zahlreichen Rutschungen, die sich an verschiedenen Stellen im See ereigneten, mehrere Wellen dieses Typs ausgelöst haben, die sich überlagerten – ein wahrhaft Furcht einflößender Anblick.



Obwohl sich die Intensität dieser Beben also nicht quantitativ bestimmen lässt, können wir davon ausgehen, dass sie recht heftig waren. Immerhin gab es in der Zentralschweiz im vergangenen Jahrhundert viele schwächere Erdstöße – darunter eine Hand voll der Stärke 5 oder mehr. Doch keiner verursachte Mehrfachrutschungen in unserem Untersuchungsgebiet. Unsere seismischen Profile spiegeln also mit ziemlicher Sicherheit starke Erdbeben wider.

Aber wann fanden sie statt? Diese Frage erwies sich als leichter zu beantworten. Allerdings mussten wir dafür noch einmal auf den See hinaus. Zur Datierung der verschiedenen Rutschkörper galt es, Proben daraus zu entnehmen – keine einfache Sache bei Sedimenten, die mehrere Meter unter dem Boden eines etwa 150 Meter tiefen Gewässers begraben sind.

Wir lösten die Aufgabe mit einem kleinen Ponton-Boot – eigentlich nur ein Floß – sowie einem speziellen Instrument namens Kullenberg-Kerngerät: in unserem Fall ein zwölf Meter langes Stahlrohr mit einem 300 Kilogramm schweren Bleigewicht am oberen Ende. Dieses unhandliche Gerät befestigten wir an einem Stahlkabel und senkten es mit einer kräftigen Winde langsam ab.

Sobald sich der Bohrer mit seiner Spitze nur noch zehn Meter über dem Seeboden befand, gab ihn ein Auslösemechanismus frei, sodass er das letzte Stück frei fiel. Die ohnehin schon schwere Sonde drang, vom Bleigewicht zusätzlich getrieben, dann tief in die Sedimentschicht ein und füllte sich mit Schlamm. Eine Art Schnappverschluss am unteren und ein Vakuum am oberen Ende des Kernrohrs verhinderten, dass das erbohrte Material wieder herausrutschte, während wir das Rohr schließlich mühsam hochhievten.

Uns an unseren zahlreichen seismischen Profilen orientierend, zogen wir Proben aus verschiedenen Rutschkörpern sowie aus ungestörten Ablagerungen. Nach sieben Tagen harter und manchmal schmutziger Arbeit kehrten wir mit acht Sedimentbohrkernen aus zwei verschiedenen Subbecken – jeder acht bis zehn Meter lang – in unser Labor in Zürich zurück. Dort inspizierten wir die Beute.

Zeitreise in die Vergangenheit

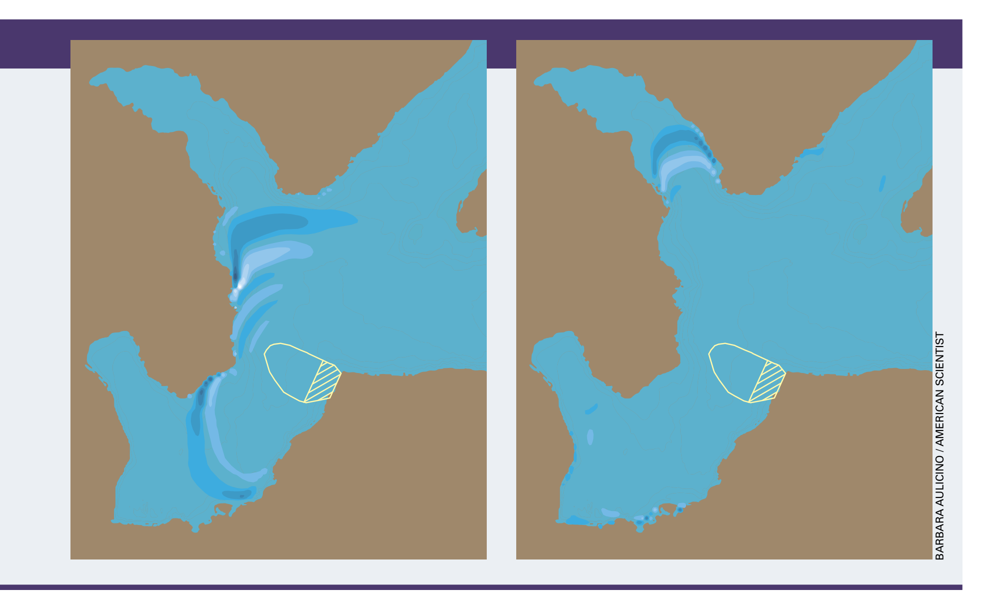
Das Öffnen der Rohre und Zerteilen der Kerne ist stets ein spannender Moment. Auch diesmal wurden wir nicht enttäuscht. Es war wie eine Zeitreise zurück in die Vergangenheit, auf die uns die Ablagerungen entführten. Sie offenbarten Klimaschwankungen und Veränderungen der örtlichen Vegetation, lieferten den greifbaren Beweis für alte Hochwässer – und natürlich für Erdbeben. Diese verrieten sich durch charakteristische Pakete aus chaotisch gefaltetem Material und darüber liegender Schicht homogenen Schlamms, die sich deutlich von den sauber horizontal geschichteten Ablagerungen anderswo im Bohrkern abhoben.

Um das Alter der Rutschkörper zu ermitteln, entnahmen wir Blätter und kleine Holzstücke aus dem ungestörten Sediment direkt darüber – organisches Material, das sich mit Hilfe der Radiokarbonmethode datieren ließ. Weitere Zeitmarken lieferten zwei Schichten vulkanischer Asche, die wir in den Ablagerungen fanden. Es gelang uns, sie mit prähistorischen Vulkanausbrüchen in der Eifel und im französischen Zentralmassiv in Verbindung zu bringen. Durch Kombination all dieser Daten konnten wir schließlich das Alter der Rutschkörper ziemlich genau eingrenzen. Demnach fanden die vier Erdbeben, bei denen sie entstanden, vor ungefähr 2470, 9820, 13 960 und 14 610 Jahren statt.

Dadurch kam eine lange Historie starker Erdbeben in diesem Gebiet ans Licht. Doch eine wichtige Frage blieb offen: Warum schwappte bei dem Ereignis von 1601 der See gleichsam hin und her, wie Cysat das in seinem Bericht schildert? Können Schlammrutschungen der von uns beobachteten Größenordnung so viel Wasser verlagern, dass bis zu vier Meter hohe Wellen entstehen? Und geht von diesen eine ernsthafte Gefahr für die Ortschaften am Seeufer aus?

Auf der Suche nach Antworten wandten sich Schnellmann und Anselmetti an einen weiteren von uns (Ward), den sie als Experten für die Simulation von Tsunamis kannten. Das sind verheerende, langwellige Wogen, die im Allgemeinen bei der plötzlichen Umlagerung großer Mengen Sediment am Grund eines Gewässers entstehen. Ihr Auftreten im Meer ist relativ gut erforscht. Über ähnliche Wasserbewegungen in Seen gibt es dagegen kaum Untersuchungen.

Per Computersimulation suchten wir also herauszufinden, ob und wie von Erdbeben ausgelöste Massenbewegungen im Vierwaldstättersee gefährlich hohe Wellen erzeugen können. Für die Modellierung wählten wir eine der Unterwasser-



rutschungen vor 2470 Jahren; denn für sie ließen sich die Abrisskante, die Bahn des weggebrochenen Materials sowie die Geometrie des resultierenden Schuttkegels besonders gut kartieren – Informationen, die für die Rekonstruktion des Vorgangs nötig sind. Gemäß unseren reflexionsseismischen Daten hinterließ die Rutschung am Rand des Sees eine neun Meter tiefe Narbe, verlagerte so viel Sediment, wie in einen riesigen Würfel von hundert Meter Kantenlänge passt, und transportierte das Material bis zu 1,5 Kilometer weit (in Luftlinie gemessen).

Mit diesen Vorgaben lieferte die Simulation tatsächlich mehr als drei Meter hohe Wogen, die schon nach einer Minute auf das gegenüberliegende Ufer trafen. Mit Wellenlängen von mehr als einem Kilometer unterschieden sie sich völlig von den normalen Oberflächenwellen, die der Wind hervorruft. Vielmehr ähnelten sie Wasserbergen, die sich im Zentrum der Subbecken auftürmten – genau wie die Augenzeugen des Erdbebens von 1601 das beobachtet und beschrieben hatten. Man stelle sich den aufgewühlten Zustand des Sees damals vor, als an verschiedenen Stellen an seinem Rand gleichzeitig große Sedimentpakete abrutschten und die resultierenden Tsunamiwellen sich überlagerten und aufschaukelten. Der Anblick der gewaltigen, hin- und herrollenden Wogen muss wahrlich Furcht einflößend gewesen sein.

Laut Bericht von Cysat kehrte sich die Strömung am Abfluss des Sees mehrfach um: Sechsmal in einer Stunde soll die Reuss vor- und zurückgeflossen sein. Demnach wechselte das Wasser etwa alle fünf Minuten die Strömungsrichtung. Auf den ersten Blick scheint das dem Ergebnis der Simulation zu widersprechen, die für die virtuellen Tsunamis eine Periode von nur knapp einer Minute ergab.

Gigantische Wasserschaukel

Wir vermuten jedoch, dass die im Takt von zehn Minuten auftretenden Oszillationen des Seespiegels erst mit einiger Verzögerung einsetzten, als das im See hin- und herschwappende Wasser in Resonanz geriet. Solche Schaukelbewegungen in großen Wasserkörpern heißen nach einem französichen Wort Seiches. Ihre Periode hängt von der Geometrie des Beckens ab. Wind und Luftdruckänderungen können ähnliche Oszillationen verursachen, allerdings mit niedrigeren Amplituden. Sie wurden im Vierwaldstättersee erstmals Ende des 19. Jahrhunderts untersucht und erfolgen dort im Zehn-Minuten-Takt; außerdem gibt es zwei längere Oszillationsperioden. Dass von Rutschungen ausgelöste Seiches die gleiche Schwingungsdauer aufweisen, erscheint plausibel.

Obwohl unsere Untersuchung viel zum Verständnis des Ereignisses von 1601 beitrug und – was weitaus wichtiger ist – die prinzipielle Eignung von Seesedimenten als prähistorische Seismografen unter Beweis stellte, bleibt noch viel zu erkunden. So genügt ein See nicht, die Epizentren und Stärken einstiger Erdbeben mit dieser Methode abzuschätzen. Dazu bedarf es mehr als eines einzigen Paläoseismografen. Zum Glück gibt es in der Zentralschweiz ein ganzes Netz davon – in Gestalt der zahllosen Seen, die als unabhängige »Aufnahmegeräte« fungieren. Da aber jeder auf Erschütterungen etwas anders reagiert, muss die Auswirkung von Erdstößen auf ein bestimmtes Gewässer jeweils anhand historischer Ereignisse geeicht werden. In Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst haben sich Mitglieder der Limnogeologie-Gruppe der ETH Zürich jetzt vier kleinere Seen in der Umgebung des Vierwaldstättersees vorgenommen und suchen darin nach Spuren historischer und prähistorischer Beben. Vom Vergleich der Daten einschließlich der unsrigen erhoffen sie sich verlässliche Aufschlüsse über die Epizentren und Stärken dieser Erschütterungen.

Renward Cysat hat sich bestimmt nicht träumen lassen, dass sein Bericht, vier Jahrhunderte nachdem die Tinte getrocknet war, die Grundlage einer seismologischen Untersuchung bilden würde, die nicht nur das von ihm geschilderte Ereignis näher beleuchtet, sondern auch ältere Erdbeben in der Zentralschweiz aufgedeckt hat. Andererseits wäre er vielleicht auch gar nicht so erstaunt darüber gewesen. Nach allem, was er von den Nachwirkungen des Erdbebens sah, mag er durchaus eine dunkle Ahnung gehabt haben, dass ein aufgewühlter See als ein Messgerät für die Stärke der Erschütterung dienen könnte – das beste, das es damals für diesen Zweck gab. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Michael Schnellmann hat gerade seine Promotion in Geologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) abgeschlossen. **Flavio S. Anselmetti**, sein Doktorvater, leitet dort das Limnogeologie-Labor, während **Domenico Giardini** Professor für Seismologie und Geodynamik sowie Direktor des Schweizerischen Erdbebendienstes ist. **Judith A. McKenzie** hat eine Professur für geologische Kreisläufe und Erdsystem-Modellierungen an der ETH inne. **Steven N. Ward** forscht an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz über Themen aus theoretischer Seismologie und Geophysik.

Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. Von M. Schnellmann et al. in: Geology, Bd. 30, S. 1131 (2002)

Landslide tsunami. Von S. N. Ward in: Journal of Geophysical Research, Bd. 106, S. 11201 (2001)

Earthquake and seiche deposits in Lake Lucerne, Switzerland. Von C. W. Siegenthaler et al. in: Eclogae Geologicae Helvetiae, Bd. 80, S. 241 (1987)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wenn Hirnsignale verrückt spielen

Bei Schizophrenie entgleisen Kommunikationsnetzwerke des Gehirns. Die Hauptschuld daran könnte ein bisher vernachlässigter Signalstoff tragen.

Von Daniel C. Javitt und Joseph T. Coyle

Das Leben des amerikanischen Mathematikers John F. Nash (geboren 1928) ist für Schizophrenie keineswegs typisch. Im Jahr 1994 erhielt er gemeinsam mit zwei Kollegen den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften – für einen genialen Beitrag zur »Spieltheorie«, den er als junger Wissenschaftler leistete (siehe Spektrum der Wissenschaft, 12/1994, S. 25). Später litt Nash jahrzehntelang an schweren Wahnvorstellungen. Doch dann erholte er sich wieder.

Der Film »A Beautiful Mind«, gedreht nach dem gleichnamigen Buch, machte Nash und sein Schicksal berühmt. Doch Wahnsinn paart sich eher selten mit Genialität. Viele Schizophrene weisen, auch schon vor Ausbruch der Krankheit, eine unterdurchschnittliche Intelligenz auf. Wenn die Psychose dann auftritt, meist im jungen Erwachsenenalter, bedeutet das oft weitere Intelligenzeinbußen.

Quer durch alle Kulturen sucht Schizophrenie etwa ein Prozent der Bevölkerung heim. Die meisten Erkrankten bleiben fortan schwer beeinträchtigt, was sich oft auch auf ihre soziale und materielle Lebenssituation auswirkt. Nur eine Minderheit vermag jemals den eigenen Unterhalt zu bestreiten. Auch gründet nicht einmal jeder zweite Betroffene eine Familie. Rund 15 Prozent der Patienten müssen längere Phasen in psychiatrischen Einrichtungen verbringen, weitere 15 Prozent werden wegen wiederholter kleinerer Delikte oder als Nichtsesshafte in Obhut genommen. Unterhalb der Armutsgrenze leben infolge der Erkrankung ungefähr 60 Prozent dieser Menschen. Von denen wird jeder Dritte schließlich obdachlos. Obwohl manche Schizophrenen im Wahn auch schwere Straftaten begehen, sind sie allgemein – bedingt durch ihre mangelhafte soziale Einbindung – häufiger Opfer von Verbrechen als Täter.

Die Möglichkeiten, eine Schizophrenie medizinisch zu behandeln, sind trotz aller Fortschritte in vielen Fällen noch immer unbefriedigend. Nur bei rund 20 Prozent der Patienten beheben die in der Regel verordneten Neuroleptika (oder Antipsychotika) sämtliche Symptome – solange sie streng eingenommen werden. Viele Kranke setzen sie aber irgendwann ab – wegen der Nebenwirkungen, weil sie gern wieder »normal« wären oder weil die psychiatrische Betreuung nicht mehr weiterläuft. Weitere zwei Drittel der Patienten erleben durch Neuroleptika zwar eine Besserung, doch symptomfrei werden sie zeitlebens nicht. Bei den Übrigen helfen die Präparate fast gar nicht.

Dass so oft keine für den Einzelnen wirklich geeigneten Medikamente existieren, hängt nicht zuletzt mit unserem immer noch mangelhaften wissenschaftlichen Verständnis der Hirnprozesse bei Schizophrenie zusammen. Die medikamentöse Behandlung macht sich zu Nutze, dass Nervenzellen miteinander über so genannte neuronale Botenstoffe oder Neurotransmitter kommunizieren. Mit solchen Signalsubstanzen stimulieren oder hemmen sie einander. Bei Schizophrenie sind manche Signalnetzwerke offensichtlich entgleist.

Jahrzehntelang stand der Botenstoff Dopamin im Zentrum der Forschungen und medikamentösen Therapien. Auf ihn zielen die gängigen Neuroleptika. Doch in den letzten Jahren erkannten die Wissenschaftler, dass dieser Ansatz vielfach nicht weit genug greift. Insbesondere interessieren sie sich nun auch für den Botenstoff Glutamat. Dopamin hat lediglich in begrenzten Gehirnregionen große Bedeutung – während Gluta- ▷

In dem Film »A Beautiful Mind« stellte Russell Crowe den geisteskranken Mathematiker John Nash dar, der Formeln an Fensterscheiben schrieb.

IN KÜRZE

- Als ein Hauptmerkmal **schizophrener Psychosen** galten lange Fehlsteuerungen im Zusammenhang mit dem **Gehirnbotenstoff Dopamin**. Doch die darauf abzielenden Medikamente helfen nur einem Teil der Patienten.
- Seit Neuerem halten Forscher den neuronalen Botenstoff **Glutamat** für vielleicht noch wesentlicher. Sie entwickeln bereits Wirkstoffe, die auf diesen Erkenntnissen basieren.

▷ mat (genauer gesagt Glutaminsäure) praktisch überall entscheidenden Einfluss ausübt.

Für ein umfassender wirkendes Behandlungskonzept müsste man die Ursachen von Schizophrenie in all ihren Fassetten verstehen. Mediziner unterscheiden drei Klassen von Symptomen: positive, negative und kognitive (also Denkleistungen betreffende). Zur Positivsymptomatik gehören motorische Unruhe, Wahnvorstellungen und Halluzinationen. Zum Beispiel glauben sich viele der Patienten bedroht oder hören Stimmen, die ihnen etwas befehlen.

Die negativen und kognitiven Symptome wirken für die Umwelt zwar weniger spektakulär, behindern den Kranken aber vielfach stärker. Häufig gehört dazu ein Komplex an Ausfällen, den Mediziner »die vier ›As‹« nennen: »Autismus« – in dem Fall Verlust des Interesses an Mitmenschen und Umwelt; »Ambivalenz« – Willenlosigkeit bis hin zur Unfähigkeit, einfachste alltägliche Entscheidungen zu treffen; »Affektverflachung« – Unfähigkeit zu stärkeren Gefühlen, was sich auch in unbeteiligter, starrer Mimik äußert; und, als ein kognitives Defizit, »Assoziationsflucht« – eine wirre Reihung von Gedanken und Sprachfetzen. Hinzu kommen unter anderem oft mangelnde Spontaneität, eine verarmte Sprache, verminderte soziale Kontaktaufnahme und verlangsamte Bewegungen. Typischerweise können Kranke sich auch schwer auf etwas konzentrieren und nicht abstrahieren. Besonders die Apathie und Teilnahmslosigkeit bedingen oft familiäre Probleme, wenn Angehörige das als Faulheit und Trägheit deuten.

Zufallsentdeckung vor 50 Jahren

In Fragebogentests, die eigentlich entworfen wurden, um Gehirnläsionen einzugrenzen, zeigen schizophrene Patienten das Muster einer umfangreichen Störung. Praktisch alle Hirnfunktionen, von der elementaren Wahrnehmung bis zu hochintegriertem Denken, sind bei ihnen mehr oder weniger beeinträchtigt. Viele Kranke können Neues schwer vorübergehend oder länger behalten. Auch werden sie mit komplizierten Situationen nicht fertig. Selbst gewöhnliche Aufgaben des Alltags überfordern sie schon. Sie können beispielsweise nicht erklären, wozu Freunde da sind oder was zu tun wäre, wenn im ganzen Haus das Licht ausfällt. Vor allem wegen solcher Einschränkungen vermögen viele Betroffene nicht selbstständig zu leben. Die Schizophrenie beraubt den Kranken seiner Persönlichkeit, seiner sozialen Kompetenz und seines gesunden Menschenverstands – alles dessen, was ein gelingendes, in die Gemeinschaft integriertes Leben ausmacht.

Dass Fehlsteuerungen im Zusammenhang mit dem Hirnbotenstoff Dopamin in der Erklärung von Schizophrenie einen hohen Stellenwert bekamen, hing mit einer eher zufälligen Entdeckung vor rund fünfzig Jahren zusammen. Damals bemerkten Mediziner, dass Wirkstoffe aus der Substanzklasse der Phenothiazine die Positivsymptomatik solcher Psychosen zu unterdrücken vermögen. Die betreffenden Stoffe sollten eigentlich gegen Allergien helfen, zeigten aber zugleich antipsychotische Wirkung. Daraus entstanden die klassischen Neuroleptika.

Studien erwiesen dann, dass diese Wirkstoffe D2-Rezeptoren blockieren, bestimmte Oberflächensensoren an Neuronen für Dopamin, die Dopaminsignale ins Zellinnere übermitteln. Außerdem entdeckte die Arbeitsgruppe des schwedischen Forschers Arvid Carlsson, einem der Medizin-Nobelpreisträger von 1990, dass Amphetamine die Dopaminfreisetzung im Gehirn anregen. Das schien zu erklären, wieso solche Stimulantien bei Missbrauch Halluzinationen und Sinnestäuschungen verursachen, die durchaus an Schizophreniesymptome erinnern.

Beides begründete die »Dopamintheorie«, wonach die meisten Erscheinungen bei einer schizophrenen Psychose auf zu viel Dopamin beruhen. Sie geht davon aus, dass der Botenstoff in einigen wichtigen Hirnregionen im Übermaß

Medikamente für neue molekulare Ziele

Die Erkenntnisse über Abweichungen in Gehirnsignalnetzen bei Schizophrenie werden bereits in potentielle Medikamente umgesetzt. Zu den hier angeführten Substanzklassen laufen schon Studien am Menschen – meist in frühen Phasen. (Glycin und D-Serin werden bisher anders genutzt. Ob sie sich gegen Schizophrenie eignen, bleibt zu prüfen.)

Angriffspunkt	angestrebte Wirkung	Beispiele
NMDA-Glutamatrezeptoren	Stimulierung, um Defekten in der neuronalen Signalübertragung zu begegnen – was viele der Symptome bei Schizophrenie mit hervorzurufen scheint	Glycin (Medifoods); D-Serin (Glytech)
AMPA-Glutamatrezeptoren	Stimulierung (durch so genannte Ampakine), um Gedächtnisleistungen und kognitive Fähigkeiten zu verbessern	CX516 (Cortex Pharmaceuticals)
metabotrophe Glutamatrezeptoren	Regulierung der Glutamatfreisetzung; Wiederherstellung der Balance zwischen NMDA- und AMPA-Rezeptoren	LY354740 (Eli Lilly)
Glycintransport	Hemmung des Abtransports von Glycin aus Synapsen (neuronalen Kontaktstellen); dadurch verstärkte Signalübertragung an NMDA-Rezeptoren	GlyT-1 (NPS Pharmaceuticals; Janssen Pharmaceutica)
Alpha-7-Nikotinrezeptor	Stimulation, dadurch würde auch die Aktivität der NMDA-Rezeptoren gesteigert (bemerkenswerterweise rauchen auffallend viele Schizophrene stark)	DMXB-A (Zentrum für Gesundheitswissenschaften der Universität von Colorado in Denver)
D1-Dopaminrezeptor	Stimulierung, um Dopaminmangel zu beheben; zunächst vor allem als Parkinsonmittel vorgesehen	ABT-431 (Abbott Laboratories)



COOP PHOTO ART COLLECTIVE

Zeigt man Gesunden solche Bilder nacheinander, erkennen sie das Dargestellte rasch. Schizophrene tun sich damit sehr schwer.

ausgeschüttet wird. Das betreffe etwa das limbische System – das Emotionen und Affekte reguliert – sowie auch das Stirnhirn, den Sitz des abstrakten Denkens.

Lücken der Dopamintheorie

Forschungen der letzten vierzig Jahre zeigten die Stärken, aber auch Schwächen dieses Konzepts. Eine Behandlung, die auf ihm fußt, hilft einem kleineren Teil der Patienten tatsächlich gut. Meist haben diese Kranken eine ausgeprägte Positivsymptomatik. Diejenigen, die daneben praktisch keine Negativsymptome zeigen – was eher selten auftritt –, können dank der Neuroleptika oft weit gehend normal leben, also auch ein normales Familienleben führen und erwerbstätig sein. Einbußen im kognitiven Bereich hat dieser Personenkreis in der Regel wenig.

Doch der Mehrzahl der Patienten hilft eine Behandlung nach dem klassischen Dopaminkonzept wenig. Bei diesen Menschen beginnt die Krankheit schleichend, wobei Negativsymptome dominieren. Solche Erkrankten ziehen sich immer mehr vor Menschen zurück und leben oft jahrelang völlig für sich. Die kognitiven Funktionen sind erheblich betroffen. Eine Therapie selbst mit den modernsten Medikamenten bringt, falls überhaupt, nur langsam Besserung.

Deswegen suchten Forscher die Dopamintheorie anzupassen. Einige vermuten, dass bei Schizophrenie ein Überangebot des Botenstoffs nur in manchen Hirnregionen herrscht, etwa im limbischen System, in anderen aber ein Mangel besteht – und zwar auch im Stirnhirn. Die Neuronen dort tragen überwiegend nicht D2-, sondern D1-Rezeptoren. Ideal würden nach diesem Modell darum Medikamente helfen, die gleichzeitig D2-Rezeptoren hemmen und D1-Rezeptoren stimulieren. Noch gibt es keine.

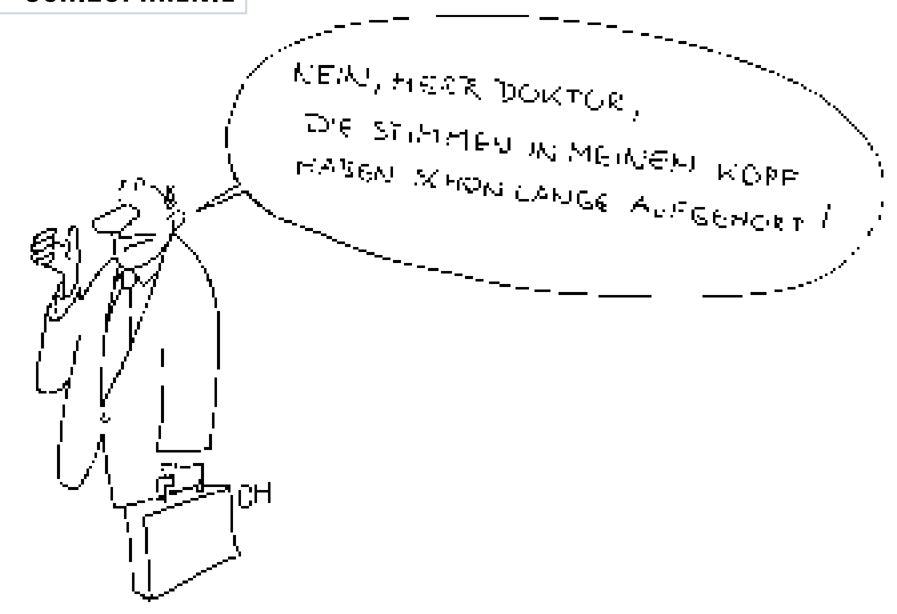
Die älteren Neuroleptika, etwa Haloperidol, erzeugten oft gravierende neurologische Nebenwirkungen, darunter Muskelsteifheit. Seit den späten 1980er Jahren gibt es Neuentwicklungen wie Clozapin, die Patienten weniger beeinträchtigen. Sie helfen zudem sowohl gegen hartnäckige positive wie negative Symptome. Clozapin ist ein so genanntes atypisches Neuroleptikum. Es hemmt Dopaminrezeptoren weniger stark als die klassischen Medikamente. Dafür beeinflusst es die Aktivität etlicher anderer Botenstoffe stärker. Nun kamen weitere Substanzen mit ähnlichen Eigenschaften auf, die auch breit eingesetzt werden. Leider können manche davon, wie sich inzwischen herausstellte, mitunter unerwartete schwere Nebenwirkungen auslösen, darunter Diabetes.

Der Verdacht kam auf, dass bei einer Schizophrenie neben Dopamin weitere neuronale Botenstoffe aus dem Gleichgewicht geraten sind. Ohnehin kann die Dopamintheorie nicht erklären, wieso Neuroleptika bei manchen Patienten ausgesprochen gut anschlagen und bei anderen so gut wie gar nicht. Sie bietet auch keine Anhaltspunkte, weswegen sich durch die Medikamente hauptsächlich die Positivsymptome bessern. Vor allem aber fand sich bisher, in mehreren Jahrzehnten Forschung, kein »Schuldiger« auf molekularer Ebene – also kein defekter molekularer Mechanismus. Weder wirken für die Dopaminsynthese zuständige Enzyme maßgeblich verändert noch scheint irgendetwas mit den Rezeptoren für den Botenstoff nicht zu stimmen.

Weiter half dagegen ein völlig anderer Befund: Ein früheres Betäubungsmittel, die Designerdroge Phencyclidin (PCP), auch bekannt als »Angel Dust« (Engelsstaub), ruft bei gesunden Personen – anders als Amphetamine – die ganze Palette besonders negativer und kognitiver Störungen der Schizophrenie hervor. Gleiches gilt für das Narkosemittel und Analgetikum Ketamin. In Tests geschieht das schon bei einzelnen und geringen Dosen.

»Künstliche« Schizophrenie

Die Parallelen zur Schizophrenie fielen erstmals in den 1960er Jahren auf. Wenn Testpersonen unter PCP etwa Sprichwörter erklären sollten, hatten sie damit ähnliche Schwierigkeiten wie Schizophrene. Neuere Versuche mit Ketamin machten noch frappantere Parallelen deutlich: Der Stoff behindert bei gesunden Probanden abstraktes Denken, Lernen, geistige Anpassungsfähigkeit und Wendigkeit sowie das Kurzzeitgedächtnis. Auch bewegen sich die Teilnehmer träge und geben sich wortkarg. Unter beiden Drogen neigen Personen zum Abbruch der Kommunikation; manche verstummen völlig. Wenn sie sich äußern, so am Gesprächsgegenstand vorbei und nie abstrahierend. Halluzinationen erleben gesunde Testpersonen mit den Drogen selten, Schizophrene allerdings stärker als sonst. ▷



Nach all dem scheinen PCP und Ketamin irgendwelche Schlüsselmechanismen von Schizophrenie nachzuahmen. Und zwar dürfte hieran der Botenstoff Glutamat beteiligt sein. Denn beide Drogen stören die Signalübertragung durch diesen wichtigsten aktivierenden Neurotransmitter des menschlichen Gehirns. Genauer gesagt blockieren sie einen bestimmten Glutamatrezeptor, den NMDA-Rezeptor, der für Gehirnentwicklung, Lernen, Gedächtnis und die neuronale Informationsverarbeitung allgemein entscheidend ist.

Dieser Rezeptor ist auch zur Regulation der Dopaminfreigabe wichtig. Wird er blockiert, beobachtet man die gleichen veränderten Dopaminmuster wie bei Schizophrenie. Das bedeutet offenbar: Die negativen und kognitiven Symptome einer Schizophrenie sind direkt durch Störungen des NMDA-Rezeptors erklärbar, und auch auf die Positivsymptomatik hat er über das Dopaminsystem Einfluss.

Im gesunden Gehirn verstärken NMDA-Rezeptoren selektiv neuronale Signale. Das muss man sich ähnlich vorstellen, wie wenn die Transistoren eines alten Radios schwache Funkwellen in starke Töne, sprich Lautsprechervibrationen, umsetzen. Der Effekt ermöglicht dem Gehirn, bestimmte Informationen zu Gunsten anderer zu ignorieren – also sich auf eine Auswahl zu konzentrieren. Bei Schizophrenen ist dieser Mechanismus offenbar beeinträchtigt. Gesunde Menschen reagieren zum Beispiel auf seltene Geräusche stärker als auf oft gehörte. Auch lauschen sie mehr auf Töne in ihrer Umgebung als auf solche, die sie beim Sprechen selbst erzeugen. Beides ist bei Schizophrenen anders. Anscheinend arbeitet bei ihnen diese Filterung nicht richtig.

Nur – warum haben Schizophrene eine verminderte NMDA-Rezeptoraktivität? Noch wissen wir das nicht. Zwar deutet sich an, dass Kranke tatsächlich weniger NMDA-Rezeptoren besitzen. Die entsprechenden Gene für diese Strukturen scheinen jedoch intakt zu sein. Sofern die Rezeptoren selbst in Ordnung und auch in hinreichender Menge vorhanden sind, könnte der Fehler darin liegen, dass etwas mit der Glutamatfreisetzung nicht stimmt oder dass sich irgendwelche Substanzen anreichern, die den Rezeptor behindern.

Neue Erklärung – neue Behandlung

Vielleicht trifft sogar beides zu. Gehirne verstorbener Schizophreniekranker wiesen sowohl reduzierte Glutamatspiegel auf als auch erhöhte Konzentrationen zweier Substanzen, welche die Aktivität von NMDA-Rezeptoren beeinträchtigen: NAAG und Kynurensäure. Auch Homocystein blockiert NMDA-Rezeptoren. Der Blutspiegel dieser Verbindung ist bei Schizophrenie erhöht. Verlauf und Symptomatik der Erkrankung sprechen dafür, dass ihre Ursache tatsächlich in der Ansammlung solcher Substanzen im Gehirn zu suchen sein könnte. Gesichert ist das aber noch nicht. Möglicherweise stört ein ganz anderer Mechanismus die NMDA-Rezeptoraktivität.

Immerhin wecken all diese Erkenntnisse wie auch vorläufige Patientenstudien Hoffnungen, dass es auch für bisher schwer behandelbare Patienten eine Medikamententherapie geben wird. Clozapin etwa ist eines der derzeit effektivsten Schizophreniemedikamente der neuen Generation. In Tierstudien vermag diese Substanz die durch PCP hervorgerufenen Verhaltensstörungen zu beheben. Keines der klassischen Neuroleptika leistet das. Viel versprechende Ergebnisse lieferte auch die kurzfristige Gabe von Stimulantien für NMDA-Rezeptoren.

Zumindest können nun langfristige klinische Studien mit Substanzen beginnen, welche die NMDA-Rezeptoren stimulieren. Sollten sie sich auch in Tests mit größeren Patientenzahlen bewähren, hätten Ärzte eine völlig neue Substanzklasse zur Verfügung, die erstmals eigens zur Behandlung der negativen und kognitiven Schizophreniesymptome entwickelt wurde.

Bei Erkrankten, die zu ihren normalen Medikamenten die Aminosäuren Glycin und D-Serin erhielten, gingen die kognitiven und negativen Symptome um 30 bis 40 Prozent zurück. Auch die Positivsymptomatik nahm ab. Ähnliches geschah durch D-Cycloserin, ein Tuberkulosemittel, das auch mit dem NMDA-Rezeptor interagiert. Das amerikanische Nationale Institut für geistige Gesundheit in Bethesda (Maryland) hat an vier großen Kliniken Therapiestudien mit D-Cycloserin und Glycin organisiert, deren erste Resultate jetzt anstehen. Auch Tests mit D-Serin, die in anderen Ländern stattfinden, stimmen bisher optimistisch.

Ebenfalls positiv verliefen Versuche, diese Wirkstoffe mit atypischen Neuroleptika der jüngsten Generation zu kombinieren. Damit würden alle drei Symptomklassen der Schizophrenie gleichzeitig beherrschbar.

Vielleicht eignet sich von den derzeit getesteten Mitteln noch keines für die Praxis. Unter anderem können zu hohe Dosierungen erforderlich sein. Deswegen suchen wir und andere auch nach Alternativen, um die Funktion der NMDA-Rezeptoren zu verbessern. Ein Weg wäre, den Abtransport von Glycin an den Hirnsynapsen durch entsprechende Hemmstoffe der Transportmoleküle zu verlangsamen. Erforscht werden zudem Stoffe, die eine andere Klasse von Glutamatrezeptoren aktivieren: die AMPA-Rezeptoren, die mit NMDA-Rezeptoren zusammenarbeiten. Des Weiteren wird überlegt, den Abbau von Glycin oder D-Serin im Gehirn zu hemmen.

Das schizophrene Gehirn

Gestörte Kommunikationsnetze

Bei Schizophrenie funktionieren viele Hirnregionen und neuronalen Signalsysteme nicht normal, darunter die in dem großen Hirnschema farblich hervorgehobenen Gebiete.

Basalganglien
beteiligt an Bewegungskontrolle, Emotionen und Integration von Sinnesinformationen; bei Verfolgungswahn und Halluzinationen offenbar gestört

Hörrinde mit sensorischem Sprachzentrum
Hören und Verstehen von Sprache; bei Überaktivität akustische Halluzinationen, als würden außen Stimmen ertönen

Hinterhauptslappen
verarbeitet Seheindrücke; starke visuelle Halluzinationen bei Schizophrenie selten; Störungen erschweren jedoch das Verstehen komplexer Bilder, das Erkennen von Bewegungen und die Deutung von Mimik

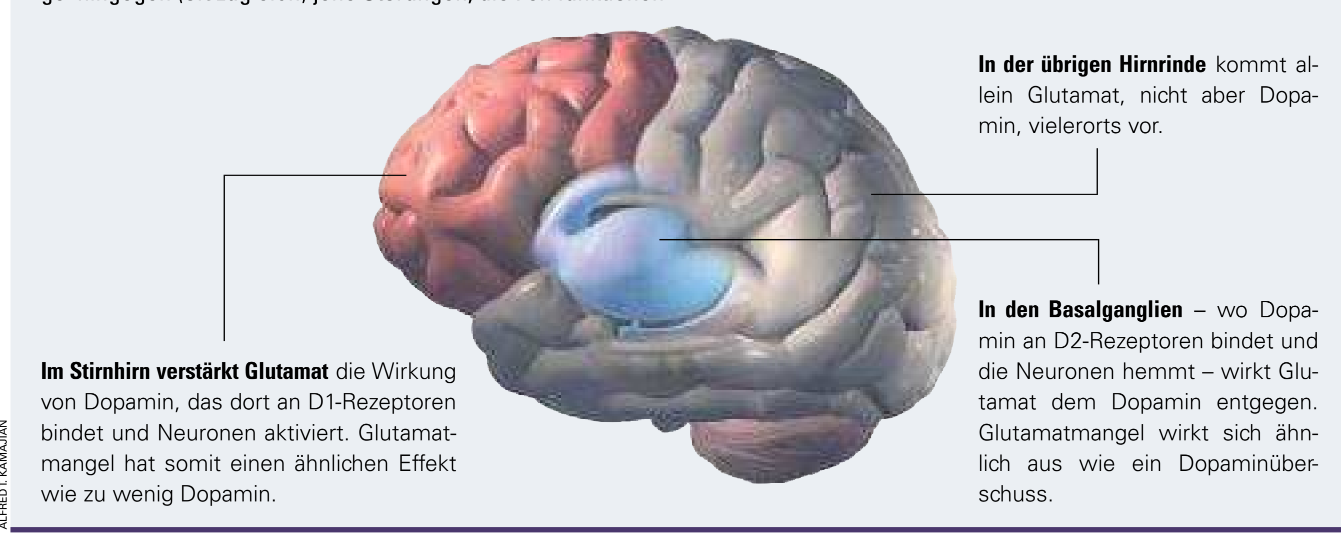
Stirnhirn (Frontallappen)
maßgeblich für hochintegrierte Denkleistungen; Störungen dieses Areals beeinträchtigen die Fähigkeit, Handlungen vorauszuplanen und Gedanken zu strukturieren

limbisches System
wichtig für Gefühle; Fehlfunktionen tragen mutmaßlich zur Unrast vieler der Kranken bei

Hippocampus
Lernen und Gedächtnisaufbau; diese Funktionen sind bei Schizophrenie beeinträchtigt

Verschiedene Neurotransmitter – gleicher Effekt

Einem Modell zufolge ruft Dopaminüberschuss die von den Basalganglien verursachten Symptome hervor, Dopaminmangel hingegen (oft zugleich) jene Störungen, die Fehlfunktionen in der frontalen Hirnrinde betreffen. Beides könnte jedoch genauso zu wenig Glutamat bewirken.

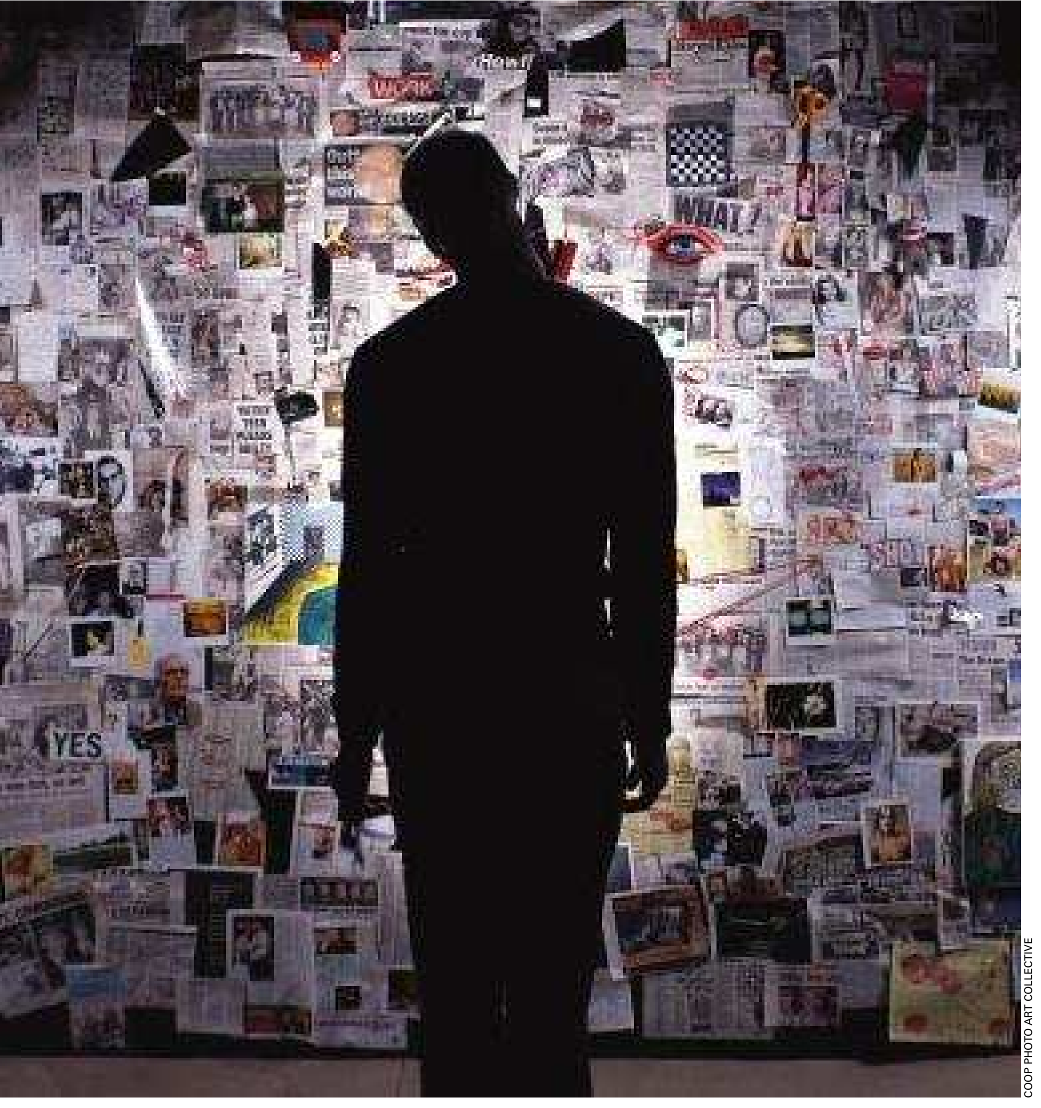


In der übrigen Hirnrinde kommt allein Glutamat, nicht aber Dopamin, vielerorts vor.

Im Stirnhirn verstärkt Glutamat die Wirkung von Dopamin, das dort an D1-Rezeptoren bindet und Neuronen aktiviert. Glutamatmangel hat somit einen ähnlichen Effekt wie zu wenig Dopamin.

In den Basalganglien – wo Dopamin an D2-Rezeptoren bindet und die Neuronen hemmt – wirkt Glutamat dem Dopamin entgegen. Glutamatmangel wirkt sich ähnlich aus wie ein Dopaminüberschuss.

ALFRED T. KAMAJIAN



COOP PHOTO ART COLLECTIVE

An sich belanglose Dinge bergen für Schizophrene oft einen Sinn. Häufig horten sie zum Beispiel Zeitungsausschnitte oder Bilder, wie hier nachgestellt.

▷ Als Wissenschaftler an Hirngewebe Verstorbener mittels Genchips die Aktivitäten zehntausender Gene bei Schizophrenen und Gesunden verglichen, stellten sie fest, dass viele für die neuronale Signalübertragung bedeutende Gene bei den Kranken weniger aktiv waren. Was das über die Entstehung einer Schizophrenie besagt oder wie sich der Befund ärztlich nutzen ließe, ist aber nicht klar.

Erbfaktoren nicht allein maßgeblich

Dass Erbfaktoren recht großen Einfluss darauf haben, ob jemand an Schizophrenie erkrankt, ist seit Langem bekannt. Jedoch sind sie offenbar nicht allein maßgeblich. So entwickelt bei eineiigen Zwillingen der zweite nur in der Hälfte der Fälle ebenfalls eine schizophrene Psychose, wenn sein Zwillingsgeschwister daran leidet. Offenbar wirken Außenfaktoren beim Ausbruch der Krankheit mit – so wie sie vielleicht manchen davor schützen, obwohl er eine Veranlagung trägt. Als Risikofaktoren der Umwelt verdächtigen Forscher unter anderem vorgeburtliche Infektionen, Fehlernährung, Geburtskomplikationen und Hirnschäden.

In den letzten Jahren wurden mehrere Gene entdeckt, die wohl mit einer erhöhten Anfälligkeit für Schizophrenie in Zusammenhang stehen. Eines davon kodiert, besonders im Stirnhirn, für ein Enzym des Dopaminstoffwechsels. Zwei andere dieser Gene scheinen die Anzahl der NMDA-Rezeptoren im Gehirn zu beeinflussen. Ein Enzym, das D-Serin abbaut, kann in verschieden stark aktiven Varianten auftreten. Menschen mit der aktivsten Form tragen ein etwa fünffach erhöhtes Risiko für Schizophrenie.

Varianten anderer Gene mögen für einzelne Störungen bei einer schizophrenen Psychose verantwortlich sein, für die Krankheit selbst jedoch nicht. Die teils widersprüchlichen Befunde zeigen, dass eine Reihe von Genen als Schuldige in Frage kommen, sowie auch, dass ein einzelnes verändertes Gen das Erkrankungsrisiko vermutlich nur gering erhöht. Das erklärt, wieso die Patienten auf die unterschiedlichen Neuroleptika so verschieden ansprechen.

Im Durchschnitt ist das Gehirn von Schizophrenen kleiner als das von Gesunden. Nach neueren Befunden beschränken sich Defizite keineswegs nur auf Bereiche wie das Stirnhirn. Mit bildgebenden Verfahren lässt sich beobachten, dass bei Kranken viele Hirnregionen nicht ordnungsgemäß arbeiten. Das gilt etwa auch für Zentren, die Seh- oder Höreindrücke verwerten.

Vielleicht ist die wichtigste neuere Erkenntnis: Für Schizophrenie ist nicht eine einzelne Hirnregion allein »verantwortlich«. Normales Verhalten erfordert die koordinierte Aktivität des ganzen Gehirns. Die Funktionsstörungen einer Schizophrenie sind Ausdruck dessen, dass irgendwelche subtilen Interaktionen innerhalb und zwischen Hirnregionen zusammenbrechen.

Viele Forscher nehmen heute an, dass eine schizophrene Psychose zahlreiche Ursachen haben kann. Möglicherweise handelt es sich sogar um ein Spektrum verschiedener Erkrankungen, aber mit ähnlichen und teilweise überlappenden Symptomen. Ein besseres Verständnis der neurobiologischen Zusammenhänge sollte dazu beitragen, dem einzelnen Kranken eine auf sein Gehirn abgestimmte Therapie zu bieten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Daniel C. Javitt (oben) und **Joseph T. Coyle** forschen seit vielen Jahren an Schizophrenie. Javitt hat eine leitende Position am Nathan-Kline-Institut für psychiatrische Forschung in Orangeburg (US-Bundesstaat New York) und ist Professor für Psychiatrie an der New-York-Universität. Coyle hat die Eben-S.-Draper-Professur an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) inne.

Zwischen Wahn und Wirklichkeit. Von Franz X. Vollenweider et al. in: Gehirn&Geist, Heft 4, 2002, S. 36

Das Rätsel Schizophrenie. Von H. Häfner. C. H. Beck, München 2000

The emerging role of glutamate in the pathophysiology and treatment of schizophrenia. Von D. C. Goff und J. T. Coyle in: American Journal of Psychiatry, Bd. 158, Heft 9, S. 1367, Sept. 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

INVENT GMBH

Der Teufel steckt im Detail

Wenn Metall durch Faserverbunde ersetzt werden soll, sind Knowhow und Gespür gefragt.

Von Tim Schröder

Wer Flugzeuge baut, spart an jedem Kilogramm Gewicht, denn das kostet Treibstoff. Schon seit längerer Zeit setzen Luft- und Raumfahrtunternehmen deshalb auf Faserverbundwerkstoffe. Die Bauteile daraus bestehen aus einem feinen Fasergewebe, das mit Kunstharz gefüllt und anschließend unter Druck und Hitze zu einem sehr leichten und stabilen Werkstück ausgehärtet wird. Das Material hat aber seine eigenen Gesetze, ein Werkstoffwechsel erfordert Expertenwissen. Die Braunschweiger Firma Invent GmbH, ein Spin-off des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), übernimmt die Entwicklung der Prototypen.

Soll Aluminium oder Stahl durch den leichteren Kunststoff ersetzt werden, berechnen die Ingenieure meist das Design neu, denn der Faserverbundkunststoff nimmt Kräfte anders auf als Metall. Deshalb orientiert man die Fasern entsprechend der zu erwartenden Belastung in unterschiedliche Richtungen.

Auch das Produktionsverfahren muss bei einem solchen Vorhaben genau bedacht werden. Um Bauteile mit hoher Qualität zu fertigen, entwickelten die Braunschweiger in Kooperation mit dem DLR das so genannte SLI-Verfahren, den Single-Line-Injektion-Prozess. Das Fasermaterial wird dabei in eine Negativform des Bauteils gelegt und mit einer Polymerfolie abgedeckt. Anschließend saugt eine Vakuumpumpe die Luft aus dem Sandwich-Aufbau. Die Druckdifferenz presst die Fasern eng an die Form. Dann strömt dünnflüssiges Harz ein und füllt Hohlräume lückenlos aus. Anschließend erhitzt man das Faser-Harz-Paket unter Druck. Nach zwei bis fünf Stunden ist das Bauteil ausgehärtet. Da man bei der SLI-Methode für das Absaugen der Luft und die Injektion des Harzes dieselbe ventilgesteuerte Leitung nutzt, sprechen die Experten von Single-Line (eine Leitung).

»Dank der Injektion im Vakuum verbleiben im Verbundwerkstoff keine Poren. Diese so genannten Lunker sind gern Ausgangspunkt für Risse«, lobt Entwicklungsleiter Carsten Schöppinger. Das Bauteil sei perfekt dicht und durch das geringe spezifische Gewicht der Fasern trotzdem sehr leicht. Für die Firma AVcraft in Oberpfaffenhofen entstand so eine leichte Verkleidung für die Triebwerke des neuen DO-328-Jets.

Schöppinger zählt weitere Vorteile des SLI-Verfahrens auf: »Bislang verwendet man häufig eine Methode, bei der die Form, in der das Bauteil entsteht, zwei Hälften benötigt, sozusagen Boden und Deckel. Dadurch ist die Produktion aufwändiger und teurer als unser Verfahren mit der Vakuumfolie.« Eine Alternative sind so genannte Prepregs. Das sind Fasergeflechte, die bereits mit Harz getränkt sind, was Zeit spart und die Weiterverarbeitung erleichtert. »Dieses Material ist aber teurer als unsere unbehandelten Fasern und muss außerdem in einer Kühlzelle gelagert werden, damit das Harz nicht schon vorher aushärtet.«

INVENT GMBH

Was glänzt wie Metall, ist ein Bauteil aus Faserverbundkunststoff: Diese Verkleidung für ein Jettriebwerk wurde mit einem neuen Verfahren gefertigt, um den extremen Anforderungen der Luftfahrt gerecht zu werden.

Ein Helm aus Flachs

Pro Jahr stellt Invent rund dreißig Bauteile für AVcraft her. Das erscheint wenig, unterstreicht aber die Firmenphilosophie: Prototypen in Spitzenqualität – ihr Anteil an der Fertigung macht etwa 80 Prozent des Umsatzes aus. Die Braunschweiger berechneten und konstruierten auch Verkleidungsteile für den ICE-3 und den Transrapid TR08.

Die restlichen 20 Prozent der Fertigungskapazität entfallen auf die Produktion von Kleinserien für Kunden, zum Beipiel Wellen für Textilmaschinen. Der Verbundwerkstoff erlaubt höhere Umdrehungsgeschwindigkeiten und somit eine schnellere Produktion, denn er ist steifer und zugleich leichter als der sonst übliche Stahl. In einer Kleinserie von 80 Stück pro Tag fertigt Invent auch mit einem herkömmlichen Pressverfahren einen Schutzhelm aus nachwachsenden Rohstoffen für die Braunschweiger Firma Schuberth Helme. Das Ziel – der Helm soll leichter sein als solche aus Glasfaserverbundwerkstoffen, aber Stöße besser abdämpfen, und zudem kostengünstig – ließ sich mit einer Mixtur aus gleichen Teilen Flachs und Baumwolle realisieren.

Das größte Hindernis für eine weitere Verbreitung von Faserverbundwerkstoffen ist die aufwändige Fertigung. In der Automobilindustrie werden Bleche im Sekundentakt in Form gebracht, und das per Roboter. Das Einlegen von Fasern in die jeweiligen Formen erfolgt heute aber meist noch manuell. Alternativen zu entwickeln ist ebenfalls eines der Ziele der Invent GmbH.

Tim Schröder ist Biologe in Oldenburg.

Die Arsen-Katastrophe von Bangladesch

Weltweit drohen 50 Millionen Menschen Arsenvergiftungen durch Trinkwasser – die größte Massenvergiftung der Geschichte. Neue Lösungen für das akut schwer betroffene Bangladesch könnten sich auch andernorts bewähren.

Von A. Mushtaque R. Chowdhury

Kühles, klares Wasser fließt aus dem Brunnen, wo Pinjra Begum das Trinkwasser für ihre Familie holte. Sie war eine schöne Braut, als sie mit 15 Jahren heiratete. Aber dann wurde ihre Haut fleckig. Später bekam sie abstoßende Geschwüre. Ihr Mann nahm sich eine andere Frau. Als Mutter dreier Kinder starb Pinjra Begum vor vier Jahren, mit 26, an Krebs.

Die junge Frau hatte sich durch den neuen Brunnen vergiftet. Früher starben in Bangladesch unzählige Kinder an Durchfallerkrankungen. Große Teile der Bevölkerung versorgten sich damals mit unsauberem Wasser aus Teichen, Flüssen oder offenen Brunnen. Deswegen strengte die Regierung Bangladeschs zusammen mit internationalen Hilfsorganisationen unter Führung der Unicef in den 1970er und 1980er Jahren das Riesenprojekt an, möglichst jedem Haushalt im Land Zugang zu sauberem Trinkwasser zu verschaffen. Als ideale Lösung propagierten die Verantwortlichen einfache, stabile Rohr- oder Röhrenbrunnen – so genannte Rammbrunnen – mit Handpumpe, die sich aus oberflächennahen Grundwasserleitern speisen. Solche Brunnen waren nicht allzu teuer. Selbst viele arme Familien errichteten mit Hilfe günstiger Kredite von nichtstaatlichen Organisationen in ihrem Hof eine eigene Wasserpumpe.

Bald lernten die Bangladescher diesen Fortschritt zu schätzen. Man war nicht mehr von besser situierten Nachbarn abhängig. Die Frauen mussten kein Wasser mehr weit heranschleppen. Vor allem aber hatten die Familien endlich keimfreies Trinkwasser. In den frühen 1990er Jahren verfügten 95 Prozent der Bevölkerung über vermeintlich gesundes, reines Wasser – für eines der ärmsten und dichtestbesiedelten Länder der Welt mit heute gut 140 Millionen Einwohnern ein besonderer Erfolg. So gut wie ausschließlich holten sich die Menschen das Wasser aus den neuen Rohrbrunnen, von denen im Land nun mehr als zehn Millionen standen.

Dieses Wasser auf Arsen zu prüfen – oder genauer auf dessen hochgiftige wasserlösliche Verbindungen – hielt man damals nicht für nötig. Dabei deutete in Indien an der tropenmedizinischen Fakultät in Kalkutta der Hautarzt Kshitish C. Sahas schon 1983 charakteristische Hautschäden bei einigen seiner Patienten als Arsenvergiftungen. Er erkannte auch bereits den Zusammenhang mit Rohrbrunnen. Die betreffenden Personen lebten größtenteils im ostindischen Bundesstaat Westbengalen, der mit Bangladesch einige Grundwasserleiter (so genannte Aquifers) gemein hat. Manche von Sahas' Patienten stammten sogar aus Bangladesch.

In den folgenden Jahren wies der Umweltwissenschaftler Dipankar Chakraborti von der Jadavpur-Universität in Kalkutta nach, dass viele Grundwasservorkommen in Westbengalen stark mit Arsen verunreinigt sind. Dennoch erklärte der Britische Geologische Dienst, das Wasser in Bangladesch sei in Ordnung – bei im Jahr 1993 durchgeführten



DILIP MEHTA / CONTACT PRESS IMAGES

Obwohl dieser Brunnen im Dorf Bilkada in Bangladesch arsenverseuchtes Wasser liefert, füllen die Frauen hier immer noch ihre Krüge. Zu den Opfern gehört der junge Bauer Abdul Rahman, dessen linker Fuß wegen bösartiger Wucherungen abgenommen werden musste.

umfangreichen Messungen hatte man Arsen allerdings nicht berücksichtigt. Zur selben Zeit noch deckte Abdul W. Khan vom Amt für Öffentliche Gesundheitstechnik des Landes auf, dass Rohrbrunnen in Nawabganj, einem Distrikt im Westen Bangladeschs, Wasser mit hohen Arsenkonzentrationen lieferten.

Nach dem heutigen Kenntnisstand enthält das Wasser von etwa 30 Prozent der neuen Brunnen Bangladeschs mehr als fünfzig Mikrogramm (millionstel Gramm) Arsen pro Liter – fünf bis zehn Prozent sind sogar über sechsmal so stark verunreinigt. Werte von über fünfzig Mikrogramm (0,05 Milligramm) stuft die Regierung als gefährlich ein. (Diesen recht hohen Grenzwert lege ich in diesem Artikel zu Grunde, denn ein geringerer ist mit einfachen Verfahren vor Ort schwer zu bestimmen. Die Weltgesundheitsorganisation WHO setzt als oberes Limit heute zehn Mikrogramm pro Liter an; ebenso die deutsche Trinkwasserverordnung.) Das bedeutet: Mindestens 35 Millionen Menschen in Bangladesch – rund ein Viertel der Bevölkerung – konsumieren mit dem Trinkwasser potenziell gesundheitsschädliche Mengen Arsen.

Weit schlimmer als Tschernobyl

Wie sich neuerlich herausstellt, enthalten in diesem Land bereits auch Grundnahrungsmittel zu viel Arsen, denn in der Trockenzeit werden viele Felder aus den neuen Brunnen bewässert. In dem Reis etwa, den die Bangladescher zwei- bis dreimal täglich essen, fanden Wissenschaftler der Universität Aberdeen (Schottland) zwischen 50 und 180 Milligramm pro Tonne. Die Werte hängen sowohl von der Reissorte wie vom Standort der Erzeugung ab. Ebenso bedenklich sind manche Gemüsesorten, insbesondere eine Knollenfrucht mit sogar 100 Gramm (!) pro Tonne. Richtlinien hierfür gibt es bisher praktisch nicht.

Mit dem Arsenproblem steht Bangladesch nicht allein da. Weltweit konsumieren viele Millionen Menschen stark arsenhaltiges Wasser, unter anderem in einigen Gebieten Osteuropas und Nordamerikas (siehe Karte im Kasten S. 77). Für einige der Regionen liegen schon statistische Studien über gesundheitliche Folgen vor. Schätzungen sprechen von fünfzig Millionen, die zukünftig schwer erkranken könnten. Die Arsenverseuchung ganzer Bevölkerungen durch Trinkwasser gilt als größte Massenvergiftung der Geschichte. Was hier geschieht, stellt selbst die Folgen der Tschernobyl-Katastrophe weit in den Schatten. ▷





DILIP MEHTA / CONTACT PRESS IMAGES

Schmerzhafte Wunden an den Handflächen machen die Arbeit für die von ihrem Mann verstoßene Ambia Khatum und ihre Tochter zur Qual.

Typischerweise dauert es rund zehn Jahre, bis sich eine chronische Vergiftung durch arsenverseuchtes Wasser äußerlich deutlich bemerkbar macht. Zunächst bilden sich dann schwarzgraue Flecken auf der Haut, und zwar hauptsächlich oben auf der Brust, auf dem Rücken und an den Armen. Auf den Handflächen und Fußsohlen erscheinen dick verhornte, taube Stellen. Hinzukommen können Bindehautentzündung und Bronchitis. Bei hohen Dosen leiden die Patienten schon vorher an Bauchschmerzen und Durchfall.

Auf der zweiten Stufe einer Arsenvergiftung kommen zu den dunklen Hautflecken weißliche hinzu. Die Beine schwellen an. Die verhornten Stellen an Handflächen und Fußsohlen brechen auf und es entstehen blutende, schmerzhafte Wunden, die sich leicht entzünden – sehr charakteristisch für eine chronische Arsenvergiftung. Gehen und Arbeiten werden dadurch äußerst beschwerlich. In diesem Stadium beginnen auch neuronale Störungen in den Gliedern. Nieren und Leber machen jetzt zunehmend Probleme. Im dritten Stadium bilden sich außerdem Hautgeschwüre. Nun droht Nieren- oder Leberversagen. Bis Krebs auftritt, können seit Beginn der Arsenexposition zwanzig Jahre und mehr verstreichen.

So jung wie Pinjra Begum an dieser Vergiftung zu sterben ist eher untypisch. Möglicherweise hatte sie von Kindheit an besonders stark arsenbelastetes Wasser zu sich genommen. Eine von zehn Personen bekommt einer Studie aus Taiwan zufolge Hautkrebs, wenn ein Liter Trinkwasser 500 Mikrogramm Arsen enthält. Meistens erliegen die Opfer allerdings bösartigen Wucherungen innerer Organe, hauptsächlich Blasen-, Nieren-, Leber- oder Lungenkrebs.

Keine wirksame Therapie möglich

Wie eine Untersuchung im Norden Chiles im Jahr 1998 ergab, hatten im untersuchten Gebiet offenbar fünf bis zehn Prozent aller mit über dreißig Jahren Verstorbenen an einem arseninduzierten inneren Krebs gelitten. Zumindest eine Zeit lang hatten die Betreffenden Wasser getrunken, das um 500 Mikrogramm pro Liter Arsen enthielt. Bei über 50 Mikrogramm Arsen pro Liter Trinkwasser würde gut jeder Hundertste an Krebs sterben, so eine Risikoberechnung des Nationalen Forschungsrats der USA von 1999.

Für Bangladesch kennt niemand das wirkliche Ausmaß der Verseuchung der Bevölkerung. Zudem steht der Höhepunkt der Epidemie erst noch bevor. Der Grad der Vergiftungssymptome – auch zum Beispiel, ob neurologische und Herz-Kreislauf-Komplikationen auftreten – hängt unter anderem von der Expositionsdauer und -dosis ab sowie vom Alter und Geschlecht. Außerdem gibt es Wechselwirkungen der Arsenverbindungen mit anderen Nahrungsbestandteilen. An Symptomen einer chronischen Arsenvergiftung leiden in Bangladesch heute anscheinend Zehntausende. Berichte sprechen bereits von einer »großen Zahl« von Todesfällen. Arsenbedingte Krebserkrankungen werden zwar schon verzeichnet, sie dürften sich aber erst in den kommenden Jahren häufen.

Das Gesundheitssystem des Landes ist mit dem Problem völlig überfordert. Ohnehin existiert für eine chronische Arsenvergiftung keine wirkliche medizinische Therapie. Ärztliche Helfer können schmerzlindernde, desinfizierende Wundsalben anbieten. Nekrotische Gliedmaßen kann man amputieren. Da unser Organismus Arsen recht gut ausscheidet, hilft es nicht viel, zur Entgiftung chemische Verbindungen, so genannte Chelate, zu verabreichen, die es binden und dann mit ausschleusen – schon gar nicht, wenn der Patient gleich wieder kontaminiertes Wasser aufnimmt. Im Frühstadium zumindest können die Vergiftungssymptome anscheinend wieder abklingen, wenn sauberes Trinkwasser zur Verfügung gestellt wird. Gerade das ist aber oft schwierig.

Zur Ursache von Bangladeschs Arsenkatastrophe, vor allem dazu, woher das Gift stammt und wie es ins Grundwasser gelangt, kursieren verschiedene Erklärungen. Laut einer Studie des Britischen Geologischen Dienstes hängt die Wasserqualität mit der geologischen Geschichte zusammen. Überwiegend befinden sich die gefährlichen Grundwasser im Süden und Südosten des Landes in zehn bis siebzig Meter Tiefe. Bangladesch erstreckt sich zum größten Teil über ein weites Flussdeltagebiet, durch das der Ganges und der Brahmaputra ziehen. Große Ströme haben in der Region in Jahrmillionen riesige Mengen Schlamm abgelagert.

Vor etwa 18 000 Jahren, als der Meeresspiegel um hundert Meter fiel, gruben

IN KÜRZE

- Die **Grundwasserbrunnen**, die Bangladesch seit Kurzem flächendeckend versorgen, galten zunächst als Segen. Doch viele davon liefern Wasser mit hohem **Arsengehalt**.
- **Vergiftungssymptome** treten gewöhnlich erst nach Jahren auf. Aber schon heute kommen viele Krankheits- und sogar Todesfälle vor. Einem **Viertel der Bevölkerung** droht ein solches Siechtum.
- Dringend gefordert sind Maßnahmen für eine andere Wasserversorgung. Die beste – allerdings teure – Lösung wären neue, tiefere Brunnen, die **arsenfreie Grundwasserleiter** anzapfen.

sich die Flüsse tief in die oft viele Kilometer dicken Sedimente ein. Später füllten sie diese Täler mit einem grauen Ton, den sie aus dem Himalaja mitführten. Anscheinend steckt darin das Arsen. Ältere braune Anschwemmungen, wie sie im Nordwesten des Landes oder in hügligen Gegenden vorkommen, sind offenbar weniger verseucht. Diese geologischen Verhältnisse müsste man bei der Wasserversorgung berücksichtigen, um des Problems Herr zu werden.

Wieso das Arsen aus dem Ton ins Grundwasser übertritt, ist heftig umstritten. Vor allem geht die Auseinandersetzung darum, ob es sich um einen natürlichen geochemischen Prozess handelt, der ohne menschlichen Einfluss abläuft, oder ob der Mensch seinen Anteil dazu beigetragen hat, etwa durch intensive Landwirtschaft – vielleicht sogar Düngung und Pestizide – und insbesondere durch umfangreiche Wasserentnahme.

Chakraborti nimmt an, dass die arsenhaltigen Schichten neuerdings Luft ausgesetzt sind, die dorthin vordringt, weil die Grundwasserspiegel wegen des großen Wasserbedarfs sinken. Das Arsen, das in dem grauen Ton an Eisenpyrite gebunden vorliege, soll durch einen Oxidationsvorgang freikommen. Tatsächlich hat Chakraborti festgestellt, dass manche Brunnen, die vor zehn Jahren noch unbedenkliches Wasser enthielten, heute arsenverseucht sind. Dem Britischen Geologischen Dienst zufolge löst sich das Arsen hingegen durch einen Reduktionsprozess, der mit Beteiligung von organischem Material direkt im Wasser stattfindet. Nach dieser Vorstellung liegt das Arsen im Sediment an Eisenoxidhydroxid gebunden vor. Wie kompliziert der Hintergrund des Problems ist, zeigen auch aktuelle Studien.

Ausbildung der Frauen

Um das Desaster in den Griff zu bekommen, gründete die Regierung von Bangladesch 1998 ein Projekt, für das die Weltbank einen 32,5-Millionen-US-Dollar-Kredit gewährte. Ein Großteil dieses Geldes wurde noch nicht in Anspruch genommen, denn bisher herrscht Unklarheit über geeignete Gegenmaßnahmen. Das Komitee für landwirtschaftlichen Fortschritt (Brac), eine nichtstaatliche Organisation, dessen stellvertretender Direktor ich bin, arbeitet jedoch seit 1997 an einer Lösung.

Vor Ort forschen wir in zwei Regionen: Sonargaon im Osten und Jhikargacha im Westen des Landes. Anfangs wollten die Dorfbewohner uns nicht einmal glauben, dass ihr schönes Wasser an den verbreiteten Vergiftungen schuld ist. Wir konnten dennoch etwa 160 Frauen, darunter auch Analphabetinnen, anlernen, mit einer Feldausrüstung den Arsengehalt von Brunnenwasser festzustellen. Wo das Wasser über 50 Mikrogramm Arsen pro Liter enthielt, sollten sie den Brunnen rot bemalen, wo der Wert darunter lag, grün.

Mehr als 50 000 Rohrbrunnen prüften und markierten die Frauen auf diese Weise. Wie Kontrollmessungen ergaben, wurden 85 bis 90 Prozent der Wasserstellen korrekt bewertet. Es zeigte sich, dass in manchen Dörfern alle Brunnen arsenverseuchtes Wasser lieferten, in anderen kein einziger. Nicht selten jedoch ▷

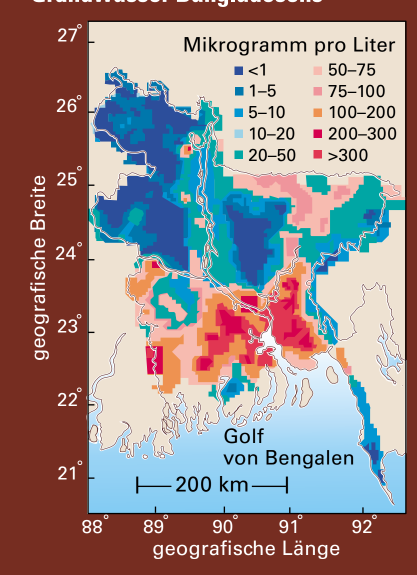
Arsen im Grundwasser

In vielen Weltregionen enthalten Grundwasserleiter bedenkliche Mengen an Arsenverbindungen (orange im Bild rechts). Wie in Bangladesch (unten) liegen sie meist in Deltas. In dem Fall haben vermutlich in jüngerer geologischer Zeit Ganges und Brahmaputra arsenhaltige Sedimente aus dem Himalaja dorthin verfrachtet. Durch welche Prozesse sich das Arsen im Wasser löst, ist allerdings noch umstritten. Wasserreservoire in älteren Schichten, die tiefer als 200 Meter liegen, sind nach Einschätzung der Wissenschaftler nicht kontaminiert (rechts unten).

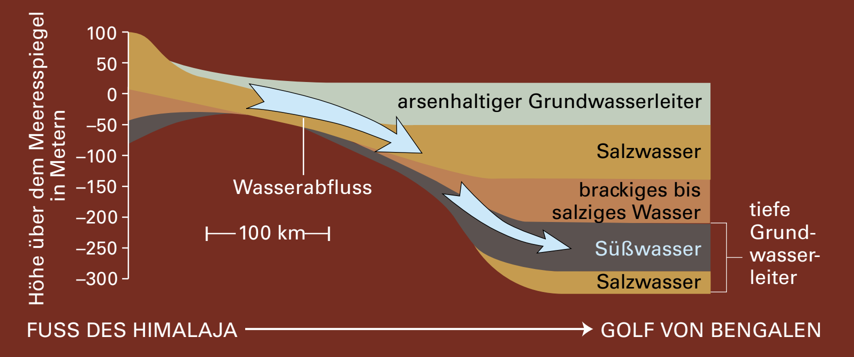
Risikogebiete



Arsen im oberen Grundwasser Bangladeschs



Herkunft des Arsens – die Schichtung im Delta von Bangladesch



LUCY READING UND JANA BRENNING; QUELLE: »ARSENIC CONTAMINATION IN SOUTH-EAST ASIA REGION: TECHNOLOGIES FOR ARSENIC MITIGATION« VON M. FEROZE AHMED IN THE WORLD BANK GROUP'S »WATER WEEK 2004« FORUM

standen gefährliche und unbedenkliche Brunnen in unmittelbarer Nachbarschaft.

Wir schulten die Frauen auch, bei den Dorfbewohnern Anzeichen einer Arsenvergiftung sowie das Stadium der Erkrankung zu erkennen. Sie identifizierten fast 400 Opfer, die nun ärztlich untersucht wurden. Bei etwa drei Viertel dieser Personen handelte es sich noch um das erste Stadium, doch einige hatten schon Krebs. 60 Prozent der Patienten waren männlich, wobei das Durchschnittsalter 36 Jahre betrug. Es gab aber auch schon fünfjährige Jungen mit Vergiftungssymptomen.

Arsenfilter in Tonkrügen

Dank der Mitarbeit der Frauen wurden auch die übrigen Dorfbewohner erstmals auf die Arsengefahr und ihren Hintergrund aufmerksam. Außerdem halfen die geschulten Kräfte zusammen mit anderen Ortsansässigen, alle Wasserstellen der Umgebung zu erfassen, die bei entsprechenden Vorkehrungen statt der verseuchten Brunnen genutzt werden könnten – also nicht nur arsenfreie Rohrbrunnen, sondern auch herkömmliche Brunnen sowie Wasserläufe und Teiche.

Wir erprobten dann, welche alternativen Versorgungsmöglichkeiten sich am besten umsetzen lassen. Neue Lösungen müssen nicht nur sicher und effizient sein, sondern unbedingt auch kostengünstig. Vor allem aber müssen die Menschen sie annehmen. Kürzlich erhielt unsere Organisation für diese Entwicklungen den Gates Award for Global Health, dotiert mit einer Million US-Dollar.

Im Wesentlichen sind die Optionen: offene Gewässer nutzen, wobei das Wasser entkeimt wird; Regenwasser verwerten; weiterhin die Rohrbrunnen nutzen, doch diesem Wasser gegebenenfalls das Arsen entziehen; denkbar ist auch eine Versorgung aus nicht verseuchten Brunnen über längere Wasserleitungen; oder man könnte wesentlich tiefere, arsenfreie Grundwasserleiter anzapfen (siehe auch Kasten S. 77).

Es gibt gute Argumente, wieder mehr Oberflächenwasser für Trinkwasser zu nutzen. Nicht nur ist dieses in Bangladesch reichlich vorhanden, sondern es enthält im Allgemeinen bis in zehn Meter Tiefe auch kein Arsen. Früher holten die Bangladescher ihr Trinkwasser aus eigens dafür vorgesehenen sauber gehaltenen Teichen. Mit den neuen Brunnen wurden die alten Trinkwasserteiche jedoch nicht mehr gepflegt, oft sogar zugeschüttet oder zweckentfremdet, etwa zur Fischzucht. Jetzt versucht man, sie wieder herzurichten. Spezielle Sandfiltersysteme, die am Rand der Teiche gebaut werden, sollen Morast und Krankheitserreger abfangen (siehe Kasten unten).

Es dürfte jedoch mühsam werden, dieses Wasser aufzubereiten. Es ist so stark mit Keimen belastet, dass die Filter, die deren Konzentration auf etwa ein Hundertstel reduzieren, noch immer einige Erreger zurücklassen. Vor allem aber enthalten die meisten Teiche Überreste toxischer Chemikalien, mit denen man Raubfische eliminierte, bevor Fischbruten eingebracht wurden. Eine weitere Hürde ist, dass die Anwohner die Sandfilter alle paar Monate säubern müssten.

Auch die herkömmlichen offenen Brunnen speisen sich aus Oberflächenwasser, das einsickert. Normalerweise enthält dieses Wasser wenig Krankheitserreger, doch kann es mit Fäkalien verunreinigt sein, muss also keimfrei gemacht werden. Regenwasser wiederum steht nicht das ganze Jahr über zur Verfügung.

Als Alternative würde es sich darum anbieten, weiterhin die neuen Rohrbrunnen zu nutzen, doch verseuchtem Grundwasser das Arsen zu entziehen. Auf recht einfache Weise könnten die Menschen mit drei übereinander angebrachten Tonkrügen ein eigenes Arsenfiltersystem betreiben (siehe Kasten links). Die oberen beiden Krüge, die unten eine Öffnung für den Wasserabfluss haben, enthalten Lagen aus Sand, Holzkohle – und als Wichtigstes eine eisenhaltige Schicht, um das Arsen zu binden. Der dritte, unterste Topf sammelt das saubere Wasser.

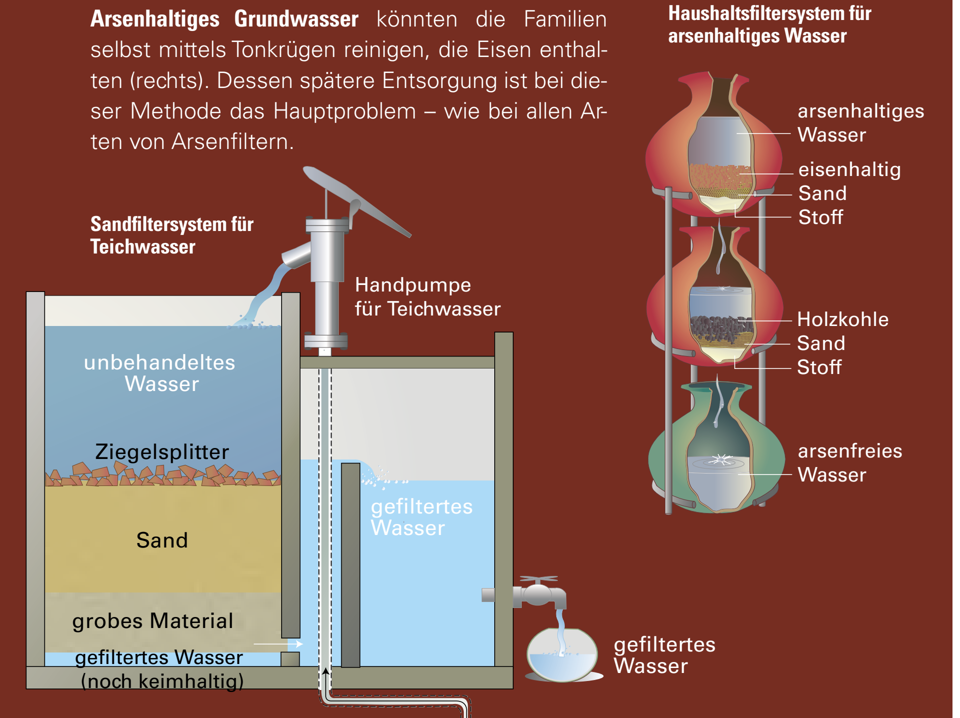
Doch selbst diese simple Methode bewährt sich in der Praxis nicht so gut, wie wir gedacht hatten. Vor allem bereitet es Probleme, die Eisenspäne regelmäßig zu erneuern. Aufwändigere Arsenfilter sind teuer, und auch sie müsste man zuverlässig reinigen.

Im Gespräch mit den Menschen wurde uns klar, dass sie jede umständliche Wasseraufbereitung als Rückschritt empfinden. Die neuen Rohrbrunnen passten gut zu ihrem Bestreben nach mehr Modernität. Meines Erachtens lässt sich das Arsenproblem nicht bewältigen, wenn man dies nicht berücksichtigt. Das bedeutet: Entweder versorgt man die ge-

Sicheres Wasser mit einfachen Mitteln

Die perfekte Methode der Trinkwassergewinnung für arme Regionen mit arsenhaltigem Grundwasser gibt es nicht. In Bangladesch könnte man wieder auf Oberflächenwasser zurückgreifen, müsste es aber filtern und desinfizieren. Zum Säubern von Teichwasser eignet sich ein einfaches Sandfiltersystem (links unten). Allerdings enthält das damit gewonnene Wasser noch Restkeime.

Arsenhaltiges Grundwasser könnten die Familien selbst mittels Tonkrügen reinigen, die Eisen enthalten (rechts). Dessen spätere Entsorgung ist bei dieser Methode das Hauptproblem – wie bei allen Arten von Arsenfiltern.



LUCY READING
QUELLE: SHARIAR SHAMS, MIT VERÄNDERUNGEN DURCH MOHAMMAD JAKARIYA BRAC

fährdeten Dörfer mit sauberem Leitungswasser, das von woanders herkommt, oder man verhilft ihnen zu eigenen Tiefbrunnen, die zu arsenfreien Wasserleitern reichen.

Seit einigen Jahren führen unsere und andere Organisationen ein Pilotprojekt durch, bei dem Dörfer über Rohrleitungen Wasser erhalten, das in zentralen Anlagen aufbereitet wird. Die Menschen nehmen die Neuerung gern an. Wie eine von uns gemeinsam mit der Weltbank durchgeführte Studie zeigt, wäre die Landbevölkerung sogar bereit, einen Teil der Installationskosten selbst zu tragen. Dennoch bliebe das Unterfangen teuer, abgesehen davon, dass eine großräumige Versorgung über Wasserleitungen viel Logistik erfordert. Sollte Bangladesch sich trotzdem dafür entscheiden, und sei es in begrenztem Rahmen, müssten Regierung und nichtstaatliche Organisationen die Anlagen unterhalten.

Keine Sicherheit ohne Kontrolle

Auf lange Sicht erscheinen tiefe Rohrbrunnen günstiger, die Wasser aus mindestens 200 Meter Tiefe holen. Unter großen Gebieten Bangladeschs liegen zwei Grundwasserleiter übereinander, zwischen denen Tonschichten lagern. Das obere Vorkommen, das auch die bisherigen Rohrbrunnen versorgt, reicht etwa siebzig Meter tief. Nach einmütiger Einschätzung der Geologen dürfte das untere Vorkommen kaum von Arsen verunreinigt sein.

Bevor aber Tausende von Tiefbrunnen angelegt werden, muss man völlig sichergehen. Außerdem braucht man eine noch nicht ausgetestete Bohrtechnologie, die gewährleistet, dass durch die Bohrlöcher nicht etwa giftiges Wasser aus dem oberen Leiter hinabsickert. All dies würde Expertenmitarbeit erfordern. Die Erfahrung, nach der alles schief geht, was schief gehen kann, scheint für Entwicklungsländer besonders zu gelten. Man nehme nur das Arsenproblem.

Die Kosten, um der Trinkwasserkatastrophe in Bangladesch Herr zu werden, veranschlagen Wissenschaftler der New Yorker Columbia-Universität auf 290 Millionen US-Dollar. Darin enthalten wären unter anderem die Erfassung des derzeitigen Zustands, verbessernde Maßnahmen und die weitere Überwachung für fünf Jahre wie auch die Anlage von 86 000 Tiefbrunnen, für jedes Dorf des Landes einen. Gemessen am Nutzen für die Menschen wäre das nicht zu viel. Doch vermutlich könnte der Staat die Summe allein nicht aufbringen.

Selbst mit Unterstützung von außen würde es einige Jahre dauern, bis eine dauerhafte Lösung gefunden und umgesetzt wäre. Aber Bangladesch hat keine Zeit mehr und muss unbedingt sofort Gegenmaßnahmen einleiten, damit die Gesundheitsschäden sich wenigstens nicht noch weiter steigern. Es gilt, die Vergiftungsopfer umgehend zu identifizieren, um sie unverzüglich mit besserem Trinkwasser zu versorgen, wie immer das jeweils machbar ist. Jeder Rohrbrunnen im Land muss sofort überprüft werden. So sehr sich die Einsatzkräfte bemühen – die Brunnentests gehen viel zu langsam voran. Beim jetzigen Tempo werden noch Jahre verstreichen, bis jedes Dorf seine Wasserqualität kennt.

Die Katastrophe in Bangladesh lehrt uns: Selbst die ärmsten Länder, oder vielleicht sie besonders, sollten alles Trinkwasser ständig auf potenziell giftige Stoffe kontrollieren. Das gilt nicht nur für Arsenverbindungen, sondern ebenso für andere potenziell giftige Chemikalien wie Mangan und Fluor, für Pestizide und Krankheitserreger. Bangladesch hat diese Maxime missachtet, was der Hauptgrund für die jetzige Situation sein dürfte. Auch scheinbar sauberes Grundwasser kann lebensgefährlich werden. ◁



A. Mushtaque R. Chowdhury arbeitet seit 1977 beim Ausschuss für landwirtschaftlichen Fortschritt von Bangladesch, einer der weltweit größten und erfolgreichsten privaten Organisationen für Entwicklung. Er gründete deren Abteilung für Forschung und Evaluation und leitet deren Arsenmaßnahmen. Derzeit ist er Gastprofessor an der Columbia-Universität in New York.

Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh, Bd. 1 – 4. Von D. G. Kinniburgh und P. L. Smedley (Hg.). British Geological Survey Technical Report WC/00/19, 2001

Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency. Von Allan H. Smith et al. in: Bulletin of the world health organization, Bd. 78, Heft 9, S.1093, Sept. 2000

Combating a deadly menace: early experiences with a community-based arsenic mitigation project in Bangladesh. Von A. Mushtaque R. Chowhury et al. in: Bangladesh Rural Advancement Commitee Research Monograph Series, Nr. 16, Aug. 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Neues Schilddrüsenhormon entdeckt

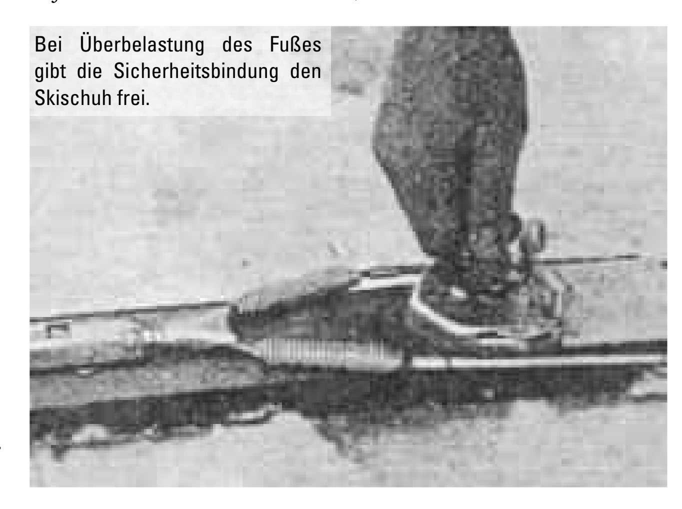
Bisher war nur ein Schilddrüsenhormon, das Thyroxin, bekannt; nun ist neuerdings von einer englischen und einer französischen Forschergruppe ein weiterer Wirkstoff der Schilddrüse, das Trijodthyronin, entdeckt worden. Es übertrifft in vielen Beziehungen … das Thyroxin um das Vier- bis Fünffache an Wirksamkeit. Die Auffindung eines zweiten Schilddrüsenhormons liefert auch eine Erklärung für die oft so verschiedenen Krankheitsbilder bei Schilddrüsen-Überfunktion. *(Kosmos, 50. Jg., Heft 12, S. II, Dezember 1954)*

Geschlechtsbestimmung mit Strom

Beim Seeigel sind die beiden Geschlechter äußerlich in der Regel nicht zu unterscheiden. Von Ethel Browne Jarney ist nun eine einfache Methode entwickelt worden, die es uns möglich macht, das Geschlecht der Tiere sehr schnell zu bestimmen. Läßt man nämlich einen Wechselstrom von 10 Volt durch ein Tier laufen, so werden Eier oder Sperma ausgestoßen. Diese schnelle Reaktion der Seeigel beruht auf dem Vorhandensein einer Schicht von glatten Muskeln in der Wand des Ovars oder des Hodens, die durch den elektrischen Strom gereizt und zur Kontraktion veranlaßt werden. Die Methode hat sich auch bei anderen Objekten als brauchbar erwiesen. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 24, S. 760, 15. Dezember 1954)*

Ski Heil – mit Sicherheit

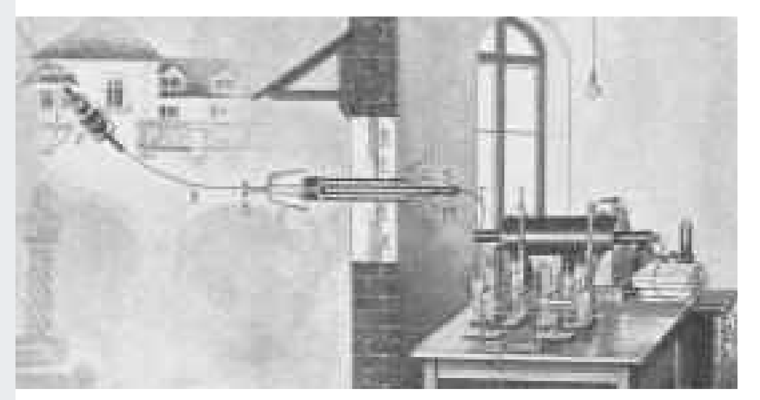
Sicherheitsbindungen für Skier wendet man immer größere Aufmerksamkeit zu, da die Zahl der Skiunfälle ständig zunimmt … Das Bild zeigt die Geze-Sicherheitsbindung, deren Haltekraft mit einer Schraube zu regulieren ist, die mit einem Geldstück eingestellt werden kann. Bei Abfahrtstürzen … öffnet sich der Sohlenhalter an der Spitze des Schuhs nach der Seite hin, und der Ski ist nur noch durch den Auffangriemen mit dem Fuß verbunden. Zu der Geze-Sicherheitsbindung gehört ferner eine Fersenführung, die durch Aushängen des Umlaufkabels ein bequemeres Gehen … ermöglicht. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 24, S. 764, 15. Dezember 1954)*


Bei Überbelastung des Fußes gibt die Sicherheitsbindung den Skischuh frei.

Strom zerstreut Nebel

Durch die englische Presse ging vor einiger Zeit die Nachricht, dass es Prof. Oliver Lodge von der Birminghamer Universität gelungen sei, selbst dichten Nebel durch elektrische Entladungen zu zerstreuen … Er stellte eine Batterie schmaler Cooper-Hewittlampen zusammen und sandte einen hochgespannten Wechselstrom eines Induktors durch diese. Ein Pol wurde mit der in einer Glasglocke befindlichen Entladungsstange verbunden (Bild) und es zeigte sich …, dass der umgebende Rauch sich in Flockenform sehr rasch niederschlug. Es fragt sich nur, ob die Kosten der Sache wert wären. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 51, S. 1003, 17. Dezember 1904)*

▼ Der Induktionsapparat (rechts) erzeugt eine Spannung von einer Million Volt, welche den Nebel um den ins Freie geleiteten Draht verschwinden lässt (links).





Schub für Krebsforschung

Das Institut für Krebsforschung in Heidelberg soll Ostern 1906 endgültig eröffnet werden und wird das erste größere Institut Deutschlands, ja in Europa sein, das auf dem Gebiete der Krebsgeschwüre wissenschaftliche Beobachtung mit der Krankenpflege verbindet. Der erste Gedanke zur Errichtung eines solchen Instituts ist auf einen ungenannten Gönner, der vor ungefähr einem Jahr 150 000 M. unter der Bedingung stiftete, daß mit diesen Mitteln ein ausschließlich der Krebsforschung dienendes Krankenhaus in Heidelberg errichtet werden solle, zurückzuführen. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Jg. 1904, Nr. 295, S. 567, 23. Dezember 1904)*

Der verwechselte Mount Everest

Als 1857 Hermann v. Schlagintweit Nepal besuchte, glaubte er, in dem die Gegend von Katmándu beherrschenden Schneegipfel Gaurisankar den Mount Everest wieder gefunden zu haben … Ende der achtziger Jahre äußerten englische Offiziere wiederholt Zweifel darüber, daß der Mount Everest und der Gaurisankar ein und derselbe Berg seien. Jetzt ist diese Frage … durch Kapitän H. Wood … endgültig gelöst worden. Dieser Offizier … machte … neue, sorgfältige Aufnahmen, welche ergaben, daß … Gaurisankar und … Mount Everest zwei verschiedene, fast 50 km von einander entfernte Berge sind! *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Jg. 1904, Nr. 282, S. 462, 8. Dezember 1904)*



Magnetantrieb für Raumfahrzeuge

Einfache Metallseile könnten Raumfahrzeuge mit billigem Strom versorgen, zu Antrieb und Steuerung beitragen und der Besatzung die Annehmlichkeiten künstlicher Schwerkraft verschaffen. Dahinter stecken elementare Naturgesetze aus Mechanik und Elektrodynamik.

Von Enrico Lorenzini und Juan Sanmartín

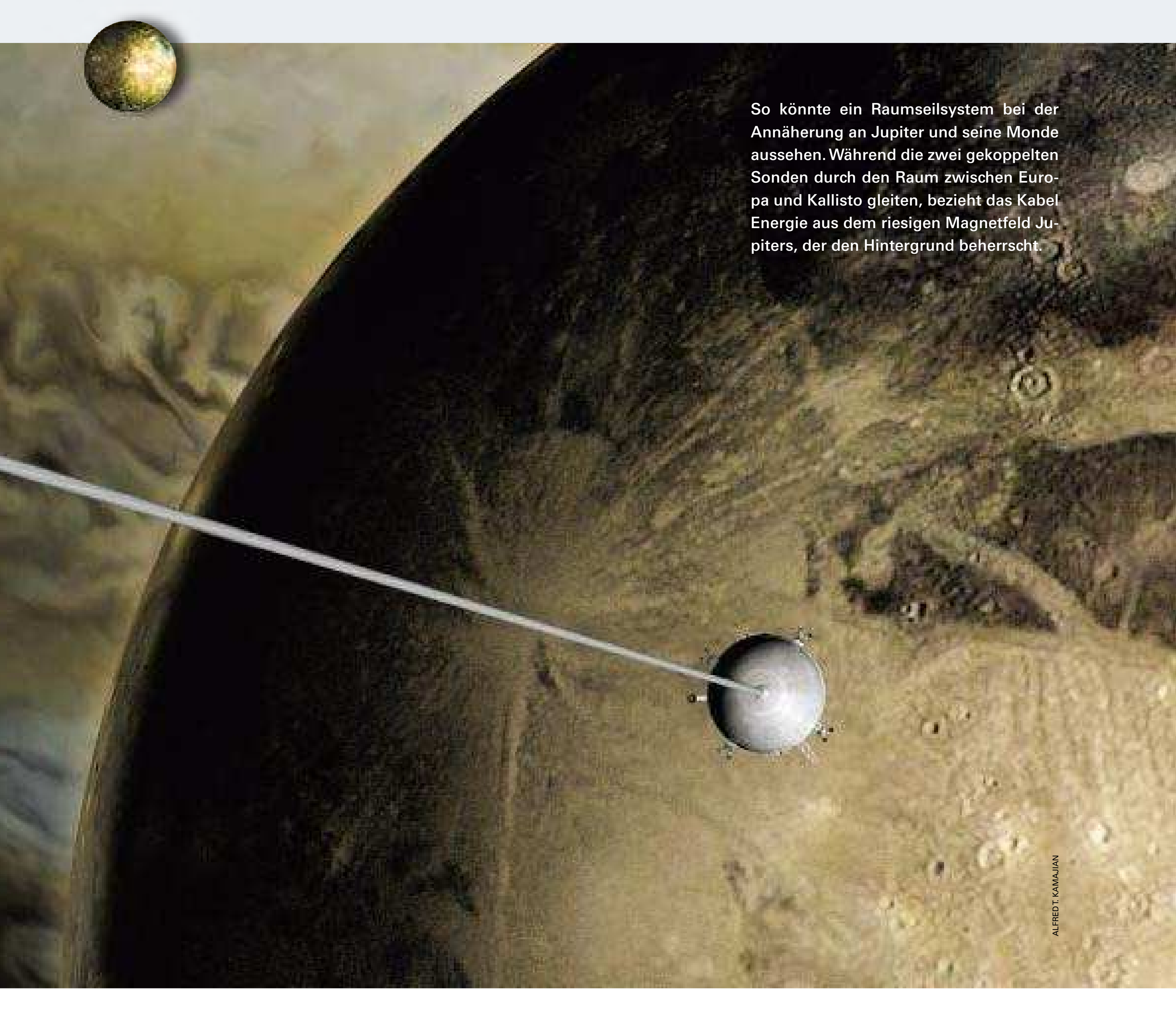
Draußen im All gibt es keine Tankstellen. Ein Raumfahrzeug muss seine Energiequellen mit sich führen – in Form von chemischen Treibstoffen, Solarzellen oder Kernreaktoren.

Die einzige Alternative ist Lieferservice von der Erde, und das kommt extrem teuer. Damit die Internationale Raumstation (International Space Station, ISS) in den nächsten zehn Jahren nicht allmählich aus der Umlaufbahn sackt, werden schätzungsweise 77 Tonnen Raketentreibstoff benötigt. Selbst wenn man für den Transport zur Station in 360 Kilometer Höhe nur 15000 US-Dollar pro Kilogramm ansetzt – nach gegenwärtigen Standards spottbillig –, kostet es 1,2 Milliarden Dollar, nur um den Status quo der Bahn zu erhalten. Noch gravierender sind die Probleme bei Reisen zu den äußeren Planeten, etwa zum Jupiter. Wegen des großen Abstands zur Sonne sind Solarzellen wenig effektiv und jedes Gramm Treibstoff muss über hunderte Millionen Kilometer transportiert werden.

Deshalb fassen Wissenschaftler eine experimentell erprobte Technik ins Auge: das Raumseil (englisch *space tether*). Dieses einfache Gerät nutzt einige physikalische Grundgesetze, um Raumfahrzeuge auszurichten, künstliche Schwerkraft und elektrische Energie zu erzeugen, Schub oder Bremswirkung zu erzeugen – all dies ohne chemische Energiequellen.

Raumseile sind Systeme, bei denen ein flexibles Kabel zwei Massen verbindet. Ist das Kabel zudem ein elektrischer Leiter, entsteht ein elektrodynamisches Seil. Während in konventionellen chemischen oder elektrischen Triebwerken der Impuls des Treibstoffs Schub liefert, nutzt ein elektrodynamisches Seil den Impuls des rotierenden Planeten, vermittelt über dessen Magnetfeld (siehe Kasten S. 85).

Seile haben Raumfahrtenthusiasten schon lange fasziniert. Visionäre wie der russische Theoretiker Konstantin Ziolkowski (1857–1935) und der britische Sciencefiction-Autor Arthur C. Clarke



So könnte ein Raumseilsystem bei der Annäherung an Jupiter und seine Monde aussehen. Während die zwei gekoppelten Sonden durch den Raum zwischen Europa und Kallisto gleiten, bezieht das Kabel Energie aus dem riesigen Magnetfeld Jupiters, der den Hintergrund beherrscht.

dachten dabei an Weltraumfahrstühle, die Menschen von der Erdoberfläche zu einem Satelliten in geostationärer Umlaufbahn befördern. Mitte der 1960er Jahre wurden bei zwei Gemini-Flügen 30 Meter lange Seile getestet, um für die Astronauten künstliche Schwerkraft zu erzeugen.

Seitdem haben unterschiedlichste Versuche mit Raumseilen stattgefunden. Die größten Probleme sind elektromechanischer Natur: Bislang gelang es nicht, die enormen elektrischen Spannungen zu meistern, die an leitfähigen Seilen im Weltraum auftreten. Hinzu kommt, dass die Seile zu Vibrationen neigen, die kaum zu bändigen sind. Ungenügend blieb auch die Haltbarkeit der Seile unter den extremen Umweltbedingungen des Weltraums.

Dennoch glauben viele Wissenschaftler, dass diese Technik gewisse Bereiche der Raumfahrt – sowohl in erdnahen Umlaufbahnen als auch bei interplanetaren Missionen – revolutionieren wird. Raumseile können Weltraumschrott beseitigen, effektiver Strom erzeugen als Brennstoffzellen, und sie sind im Stande, Satelliten auf ihrer Bahn zu halten.

Ein selbstregulierendes System

Raumseile machen sich die manchmal verblüffenden Eigenheiten der Bahnmechanik zu Nutze. Auf ein Objekt in stabiler Umlaufbahn wirken zwei entgegengesetzte Kräfte: die auswärts gerichtete, durch die Umlaufbewegung erzeugte Zentrifugalkraft und die einwärts wirkende Erdanziehung. Im Schwerpunkt des Objekts heben sich Schwerkraft und Fliehkraft exakt auf. Ein Beobachter spürt dort keinerlei Beschleunigung – er ist schwerelos oder im freien Fall.

Doch was geschieht, wenn wir zwei Satelliten betrachten, die etwas unterschiedliche Bahnen beschreiben und durch ein Seil verbunden sind? Das Seil koppelt die beiden Satelliten zu einem einzigen System. Gravitation und Zentrifugalkraft kompensieren sich wiederum im Schwerpunkt, der nun aber zwischen den beiden Satelliten liegt, nicht mehr in ihnen selbst. Der äußere Satellit spürt eine schwächere Erdanziehung und ▷

eine stärkere Zentrifugalkraft, wird also auswärts gezogen. Für den inneren Satelliten gilt das Umgekehrte: Ihn zieht es nach innen.

Das ist nicht alles. Weil der tiefere Satellit auf seiner Umlaufbahn schneller unterwegs ist, zerrt er seinen Begleiter hinter sich her. Dadurch gewinnt der äußere Satellit Tempo auf Kosten des inneren; der äußere Bahnradius wächst, während der innere schrumpft. Dieses Auseinandertreiben hält das verbindende Seil gespannt. Nichtleitende Raumseile werden üblicherweise aus möglichst leichtem und festem Material gefertigt, etwa aus Kevlar, einer Kohlenstofffaser, oder Spectra, einem hochfesten Polyethylen. Die Spannungskräfte sind recht schwach, zwischen einem halben und fünf Kilogramm für Systeme ohne Eigenrotation.

Das Ganze befindet sich nur dann im Gleichgewicht, wenn das Seil in radialer Richtung, entlang der lokalen Vertikalen, ausgerichtet ist. Sobald das System davon abweicht, entsteht ein Drehmoment, das es in die Ausgangslage zurückzieht und eine Pendelschwingung verursacht. Diese Stabilisierung wurde 1975 bei dem Erdbeobachtungssatelliten GEOS-3 verwendet, um ihn zur Erde auszurichten; das besorgte damals ein mehrere Meter langer starrer Ausleger.

Passagiere würden die unterschiedliche Erdanziehung – den Schwerkraftgradienten – als eine schwache Kraft spüren, die sie im äußeren Satelliten von der Erde wegzieht, im inneren zur Erde hin. Auf niedrigen Umlaufbahnen zwischen 200 und 2000 Kilometer Höhe würde ein 50 Kilometer langes Seil rund 0,01 g erzeugen, das heißt ein Hundertstel der Erdanziehung. Astronauten könnten da noch nicht umherspazieren, weil unterhalb 0,1 g die Haftreibung nicht ausreicht. Aber für viele Zwecke – Gebrauch von Werkzeugen, Duschen, Sammeln von Flüssigkeiten – wäre ein noch so schwaches Oben und Unten der totalen Schwerelosigkeit eindeutig vorzuziehen. Und im Gegensatz zu anderen Methoden, künstliche Schwerkraft zu erzeugen, müssen die Satelliten einander nicht umkreisen (siehe Kasten S. 86).

Ein elektrodynamisches Seil, das Aluminium, Kupfer oder andere elektrische Leiter enthält, bietet zusätzliche Vorteile. Zum einen wirkt es als Stromgenerator. Wenn ein Leiter durch ein Magnetfeld hindurch bewegt wird, erfahren seine Ladungsträger eine elektrodynamische Kraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung und zum Magnetfeld steht. Wandert ein Seilsystem von Westen nach Osten durch das nordwärts gerichtete Erdmagnetfeld, so wird im Kabel ein nach unten gerichteter Strom induziert (siehe Kasten auf gegenüberliegender Seite).

Ionosphäre als Stromquelle

Außerdem tauscht das Raumseil Elektronen mit der Ionosphäre aus. In dieser Randzone der Atmosphäre ionisiert hochenergetische Sonnenstrahlung die Atome und erzeugt ein Plasma, das heißt ein Gemisch aus Elektronen und Ionen. Das Seil fängt an einem Ende – an der positiv geladenen Anode – freie Elektronen ein und gibt sie am anderen Ende – an der negativ geladenen Kathode – wieder ab. Die elektrisch leitende Ionosphäre schließt den Stromkreis. Dadurch fließt ein gleichmäßiger Strom, der als Energiequelle angezapft werden kann. Auf einer niedrigen Umlaufbahn könnte ein zwanzig Kilometer langes Seil mit geeignet konstruierter Anode bis zu 40 Kilowatt leisten – genug, um Forschungsgeräte in einer bemannten Raumstation zu betreiben.

Das Prinzip ist schon seit den 1970er Jahren bekannt. Damals führten Mario Grossi vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (USA) und Giuseppe Colombo von der Universität Padua (Italien) erstmals Versuche mit Raumseilen durch. Seitdem fanden bereits 16 experimentelle Raumfahrtmissionen mit elektrisch leitenden oder nichtleitenden Seilen statt (Kasten auf S. 88).

Bei den ersten elektrodynamischen Seilsystemen isolierte eine Teflonhülle das leitfähige Kabel komplett von der Ionosphäre. Als Anode diente entweder eine große leitende Kugel oder ein anderer Elektronensammler. Allerdings erwiesen sich solche Anoden als ziemlich schlechte Kollektoren. In den 1990er Jahren starteten die amerikanische Raumfahrtbehörde Nasa und die italienische Raumfahrtagentur Asi gemeinsam zwei Versionen des zwanzig Kilometer langen Tethered Satellite System (TSS). Mit einer wasserballgroßen Metallkugel als Kollektor demonstrierte das TSS überzeugend die elektrodynamische Stromerzeugung im All. Allerdings stießen die Forscher auf ein Problem, das die praktische Nutzung empfindlich stört: Um eine große kugelförmige Anode bildet sich eine negative Gesamtladung, die den Zustrom weiterer Elektronen behindert – ähnlich einer Menschenmenge, die sich an einem engen Eingang staut.

Zur Lösung dieses Problems entwickelte einer von uns (Sanmartín) mit seinen Kollegen das Prinzip des nackten Kabels. Wenn das Seil größtenteils unisoliert bleibt, sammelt es die Elektronen über mehrere Kilometer Länge statt nur an einem Ende. Die dünne Zylinderform des Seils wirkt sich positiv aus: Die Elektronen müssen sich nicht an der Anode zusammendrängen, wo ihre negative Gesamtladung weitere Elektronen blockiert. Der Draht braucht dabei gar nicht rund zu sein; ein dünnes Band sammelt ebenso viel Strom, ist aber viel leichter.

Leitfähige Kabel haben einen großen Vorteil: Mit Hilfe eines Grundprinzips der Elektrodynamik können sie ihre Geschwindigkeit in der Umlaufbahn erhöhen oder verringern. Ein Magnetfeld übt auf einen stromdurchflossenen Draht eine gerichtete Kraft nach der bekannten Rechte-Hand-Regel aus. Für ein Raumseil, das auf niedriger Umlaufbahn ostwärts um die Erde kreist, wirkt die Kraft gegen die Bewegungsrichtung. Ähnlich wie beim Luftwiderstand erfährt das System eine Bremswirkung und die Bahnhöhe sinkt.

IN KÜRZE

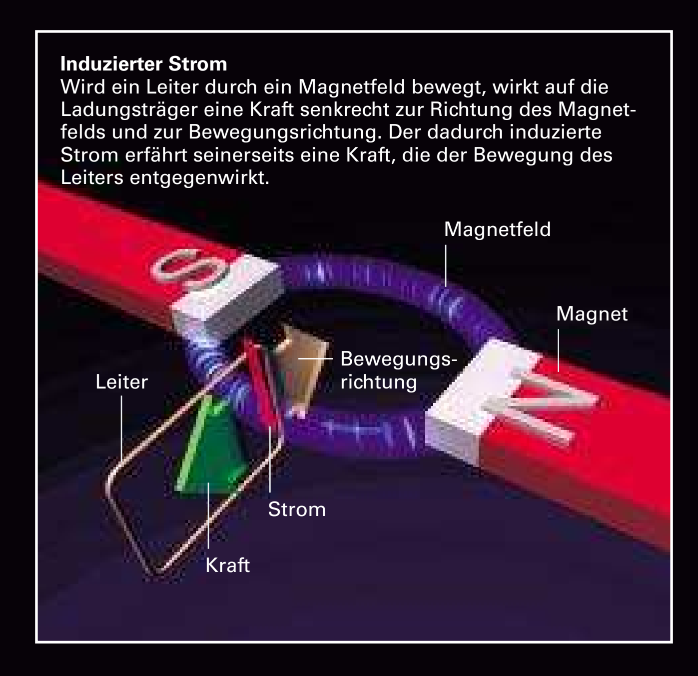
- **Elektrodynamische Seilsysteme** – bei denen zwei Massen durch ein langes elektrisch leitendes Kabel verbunden sind – können viele Aufgaben konventioneller Raumfahrzeuge übernehmen, ohne Treibstoff zu verbrauchen.
- **Auf niedrigen Erdumlaufbahnen** liefern Seilsysteme elektrische Energie und stabilisieren die Bahnen von Satelliten und bemannten Raumschiffen. Außerdem können sie beim Beseitigen von Weltraummüll helfen.
- **Bei interplanetaren Missionen**, etwa zur Erforschung des Jupitersystems, senken Raumseile den Treibstoffbedarf für Bahnmanöver und liefern elektrische Energie.

Wie elektrodynamische Seile funktionieren

Prinzipiell können elektrodynamische Seilsysteme viele Aufgaben genauso gut erledigen wie konventionelle Raumfahrzeuge – ohne dafür große Mengen an mitgeführtem Treibstoff zu verbrauchen.

Sie nutzen zwei grundlegende Prinzipien des Elektromagnetismus: In einem durch ein Magnetfeld bewegten Leiter wird Strom induziert. Und: Ein Magnetfeld übt auf Strom führende Leiter eine Kraft aus.

Induzierter Strom
Wird ein Leiter durch ein Magnetfeld bewegt, wirkt auf die Ladungsträger eine Kraft senkrecht zur Richtung des Magnetfelds und zur Bewegungsrichtung. Der dadurch induzierte Strom erfährt seinerseits eine Kraft, die der Bewegung des Leiters entgegenwirkt.



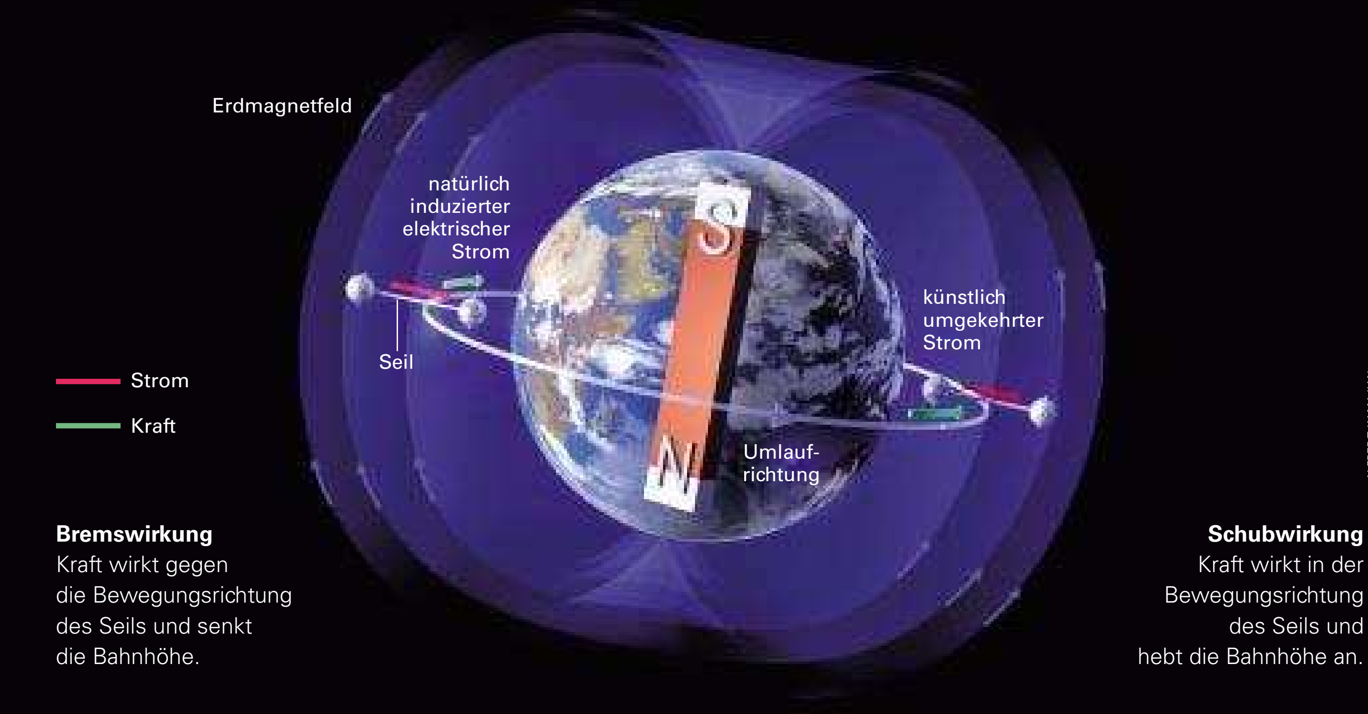
Externe Stromquelle
Eine Batterie kann die Richtung des induzierten Stroms umkehren. Elektrodynamische Kabel nutzen diesen Effekt zur Schuberzeugung. (Die Grafiken zeigen den zur gängigen Stromdefinition entgegengesetzten Elektronenfluss.)



Wie ein Stromkabel die Umlaufbahn beeinflusst

Wenn ein elektrisch leitendes Raumkabel durch das irdische Magnetfeld wandert, wird ein zur Erde gerichteter Strom induziert (links). Auf diesen übt das Erdfeld wiederum eine Kraft aus, die der Bewegungsrichtung des Kabels entgegengesetzt ist. Durch diesen Bremseffekt verliert das Kabel an Höhe.

Wird die Stromrichtung mittels Solarzellen oder einer anderen Stromquelle umgekehrt, so kehrt sich auch die Richtung der auf das Kabel wirkenden Kraft um (rechts). Sie wirkt nun in Bewegungsrichtung des Systems. Dieser Schub hebt das Kabel auf eine höhere Umlaufbahn.



Bremswirkung
Kraft wirkt gegen die Bewegungsrichtung des Seils und senkt die Bahnhöhe.

Schubwirkung
Kraft wirkt in der Bewegungsrichtung des Seils und hebt die Bahnhöhe an.

ALFRED T. KAMAJIAN

▷ Auf den ersten Blick mutet das nicht gerade wie ein nützlicher Effekt an. Aber er ist ein äußerst attraktives Mittel, um die Unmenge an Weltraummüll beiseite zu schaffen, der in Form inaktiver Satelliten und verbrauchter Raketenstufen unseren Planeten umkreist. Tatsächlich war dieses Problem für die Nasa sowie für Universitäten und kleine Firmen ein Grund, Raumseile zu entwickeln. Derzeit kreisen in niedrigen Umlaufbahnen mehrere tausend Abfallobjekte, und 1500 davon haben Massen über 100 Kilogramm. Durch Luftwiderstand verlieren sie an Höhe und verglühen beim Eintritt in die dichteren Schichten der Atmosphäre. Objekte in 200 Kilometer Höhe verschwinden üblicherweise binnen Tagen, in 400 Kilometer binnen Monaten, doch in 1000 Kilometer Höhe dauert es rund 2000 Jahre.

Künftige Satelliten könnten Kabel mitführen, die am Ende ihrer Lebensdauer entrollt würden, oder automatische Müllsammler könnten den Abfall zu einem erdumkreisenden Seilsystem schaffen. Der elektrodynamische Bremseffekt würde dann den Wiedereintritt beschleunigen (siehe Kasten auf gegenüberliegender Seite). Hingegen hätte eine Umkehrung der Stromrichtung im Kabel – beispielsweise durch Solarzellen oder eine andere Stromquelle – den entgegengesetzten Effekt. Das Seilsystem erfährt dann eine Kraft in seiner Bewegungsrichtung, das heißt einen Schub, und steigt auf eine höhere Umlaufbahn. Solche Systeme würden sich als Raumschlepper eignen, um Nutzlasten in höhere Bahnen zu befördern oder niedrige Bahnen zu stabilisieren.

Nichts gibt es ganz umsonst

Hätte die Internationale Raumstation ISS an Bord ein elektrodynamisches Kabel, das zehn Prozent der Leistung für den Stationsbetrieb liefern könnte, würde sie statt 77 nur noch 17 Tonnen Treibstoff brauchen, um die Bahnabsenkung zu vermeiden. Mit noch höherer Kabelleistung könnte man fast ganz auf den Treibstoff verzichten. Wird ein Kabel außerdem im richtigen Moment auf elektrodynamischen Schub umgeschaltet, können die entstehenden seitlichen Kräfte die Neigung eines Raumfahrzeugs ändern – ein Manöver, das normalerweise viel kostbaren Treibstoff verbraucht.

Natürlich gibt es nichts umsonst; das gebietet der Energiesatz. Zum Beispiel wird die Energie auf Kosten der Bahnhöhe gewonnen, die zuvor durch den Energieverbrauch der Raketentriebwerke erreicht wurde. Auf den ersten Blick erscheint das ziemlich sinnlos: Eine Energieform wird gegen eine andere vertauscht. Indem der Satellit Energie aus dem Raumseil entnimmt, sinkt er ab und muss wieder mit Raketen angehoben werden. Eine Brennstoffzelle verwandelt hingegen Brennstoff direkt in Elektrizität. Warum dann die Mühe?

So paradox es klingt: Raumseilsysteme sind im Prinzip wirksamer. Die Kombination Kabel plus Rakete vermag mehr elektrische Energie zu erzeugen als eine Brennstoffzelle, denn Letztere profitiert nicht von der Energie der Bahnbewegung. In einem elektrodynamischen Seil ist die erzeugte elektrische Leistung gleich der Arbeit pro Zeiteinheit, welche die magnetische Bremskraft verrichtet – das heißt Bremskraft mal Geschwindigkeit des Satelliten relativ zur magnetisierten Ionosphäre; diese beträgt auf niedrigen Umlaufbahnen rund 7,5 Kilometer pro Sekunde. Zum Vergleich: Die Leistung

Wie ein Seil künstliche Schwerkraft erzeugt

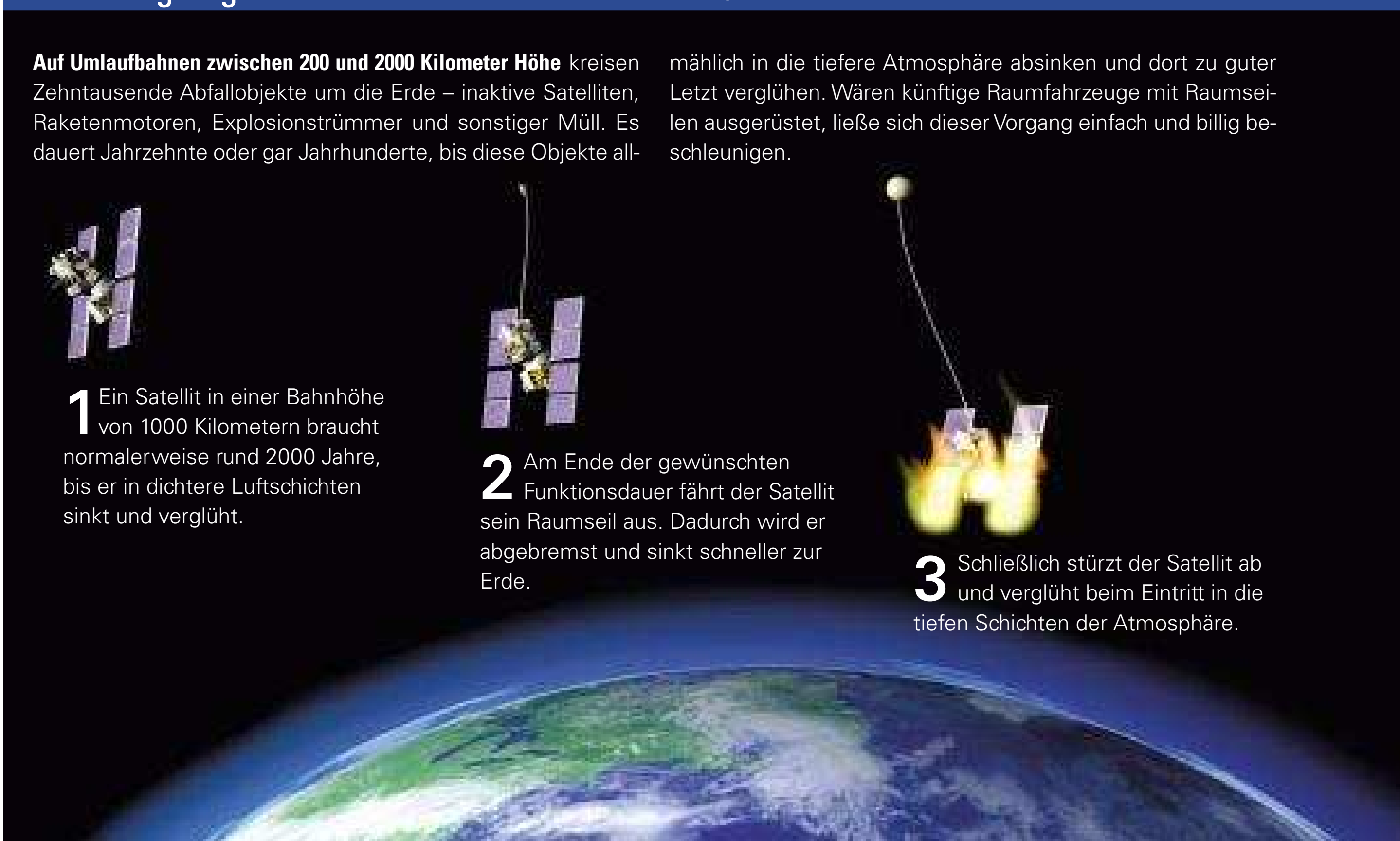
Bei jedem Objekt auf stabiler Umlaufbahn heben sich auswärts gerichtete Zentrifugalkraft und einwärts gerichtete Erdanziehung gegenseitig auf. In einem Seilsystem gilt das exakt nur für den Schwerpunkt. Bei der äußeren Kugel ist die Zentrifugalkraft ein wenig größer als die Erdanziehung. Ein Passagier würde eine geringe auswärts gerichtete künstliche Schwerkraft spüren. Für die innere Kugel gilt das Umgekehrte. Bei einem System mit 50 Kilometer langem Kabel wäre die resultierende Kraft – sie ist ungefähr proportional zur Seillänge – etwa ein Hundertstel der Erdanziehung.

Fotomontage des experimentellen Raumseilsystems Atex in halb entrolltem Zustand.

ALFRED T. KAMAJIAN; MIT FREUNDL. GEN. DES NAVAL RESEARCH LABORATORY

Beseitigung von Weltraummüll aus der Umlaufbahn

Auf Umlaufbahnen zwischen 200 und 2000 Kilometer Höhe kreisen Zehntausende Abfallobjekte um die Erde – inaktive Satelliten, Raketenmotoren, Explosionstrümmer und sonstiger Müll. Es dauert Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte, bis diese Objekte allmählich in die tiefere Atmosphäre absinken und dort zu guter Letzt verglühen. Wären künftige Raumfahrzeuge mit Raumseilen ausgerüstet, ließe sich dieser Vorgang einfach und billig beschleunigen.



ALFRED T. KAMAJIAN

eines chemischen Raketentriebwerks ist gleich der Hälfte des Schubs mal Ausströmgeschwindigkeit, und diese kann bei einem Gemisch aus flüssigem Wasserstoff und Sauerstoff maximal fünf Kilometer pro Sekunde betragen. Somit vermag eine Kombination aus Raumseil und Rakete im Prinzip dreimal so viel elektrische Leistung zu liefern wie die chemische Reaktion allein. Eine Brennstoffzelle, die ebenfalls Wasserstoff und Sauerstoff verwendet, hat diesen Vorteil nicht.

Die Kombination Kabel-Rakete braucht viel weniger Treibstoff als eine Brennstoffzelle gleicher Leistung. Allerdings ist das Raumseil schwerer als die Brennstoffzelle. Deshalb hält der Vorteil des Seilsystems nur fünf bis zehn Tage lang an.

In gewissen Fällen, etwa bei einer Mission zur Erkundung des Jupitersystems, haben Raumseile weitere Vorteile. Ein Seil, das die physikalischen Besonderheiten des Riesenplaneten ausnutzt, vermag riesige Treibstoffmengen einzusparen. Wie die Erde besitzt auch Jupiter eine magnetisierte Ionosphäre, die mit dem Planeten rotiert. Aber im Gegensatz zu unserem Planeten reicht die Ionosphäre des Jupiters über die stationäre Umlaufbahn hinaus – das heißt weiter als die Bahnhöhe, bei der ein Satellit über einem Punkt auf der Planetenoberfläche stillzustehen scheint. Bei der Erde beträgt die stationäre Bahnhöhe rund 35 800 Kilometer über dem Boden, beim Gasplaneten Jupiter 88 500 Kilometer über der Wolkenhülle.

Eine Billigreise zu Jupiter – und zurück

Auf einer stationären Bahn kreist das Raumfahrzeug ebenso schnell um Jupiter wie die Ionosphäre. Unterhalb dieser Bahnhöhe ist es schneller und das Raumseil erzeugt eine Bremskraft. Hingegen wird das Raumfahrzeug oberhalb der stationären Bahn von der rotierenden Ionosphäre überholt und erfährt einen Schub. In beiden Fällen erzeugt das Kabel außerdem nutzbare elektrische Energie.

Wieder sieht es nur so aus, als wäre all das umsonst zu haben. In Wirklichkeit wird die Energie aus der Rotation des Planeten entnommen. Aber Jupiters Drehmoment ist so gewaltig, dass die winzige Abgabe an das Raumfahrzeug vernachlässigt werden kann.

Nach den Gesetzen der Bahndynamik sind die wirksamsten Orte zum Bremsen oder Beschleunigen die beiden Punkte, in denen das Raumfahrzeug dem Jupiter am nächsten (Periapsis) oder am fernsten (Apoapsis) steht. Innerhalb der stationären Bahn wirkt das Kabel bremsend, außerhalb erzeugt es Schub. Angenommen, eine Raumsonde mit Seil nähert sich Jupiter mit einer Relativgeschwindigkeit von sechs Kilometer pro Sekunde. Ohne Bremswirkung würde sie an dem Planeten vorbeiziehen. Doch sobald die Sonde innerhalb der stationären Umlaufbahn ankommt, wird das Seil eingeschaltet und bremst die Sonde gerade so stark, dass sie in eine lang gezogene Ellipse um Jupiter einbiegt. Dafür muss sie nur um einige hundert Meter pro Sekunde langsamer werden, und das bringt schon ein gut zehn Kilometer langes Seil zu Wege.

Während die Sonde Jupiter mehrmals umrundet, schaltet die Bodenstation das Raumkabel stets nur in der Nähe der Periapsis ein, um Bremswirkung zu erzeugen und nebenbei ein wenig nutzbare Energie zu gewinnen; ansonsten bleibt das Seil abgeschaltet. Dadurch ▷

Missionen mit Raumseilsystemen

Seit Jahrzehnten starten Forscher mit unterschiedlichem Erfolg experimentelle Raumseilsysteme. Manchmal konnten die Kabel nicht bis zur vollen Länge entrollt werden. Aber selbst Teilerfolge wiesen die Fähigkeiten von Seilsystemen nach und führten zu zahlreichen Verbesserungen. Missionen mit elektrodynamischen Kabeln sind rot hervorgehoben.

Name	Datum	Umlaufbahn	Länge	Agentur
Gemini 11	1967	niedrig	30 m	Nasa
Gemini 12	1967	niedrig	30 m	Nasa
H-9M-69	1980	suborbital	500 m	Nasa
S-520-2	1981	suborbital	500 m	Nasa
Charge-1	1983	suborbital	500 m	Nasa/Isas
Charge-2	1984	suborbital	500 m	Nasa/Isas
Oedipus-A	1989	suborbital	958 m	NRC/Nasa
Charge-2B	1992	suborbital	500 m	Nasa/Isas
TSS-1	1992	niedrig	500 m	Nasa/Asi
SEDS-1	1993	niedrig	20 km	Nasa
PMG	1993	niedrig	500 m	Nasa
SEDS-2	1994	niedrig	20 km	Nasa
Oedipus-C	1995	suborbital	1 km	Nasa
TSS-1R	1996	niedrig	19,6 km	Nasa/Isas
Tips	1996	niedrig	4 km	NRO/NRL
Atex	1999	niedrig	6 km	NRL


MIT FREUNDL. GEN. DES NAVAL RESEARCH LABORATORY

Atex


MIT FREUNDL. GEN. DES NAVAL RESEARCH LABORATORY

Tips

Nasa: National Aeronautics and Space Administration (USA)
Isas: Institute of Space and Astronautical Science (Japan)
Asi: Agenzia Spaziale Italiana (Italien)
NRC: National Research Council (Kanada)
NRO: National Reconnaissance Office, baut Spionagesatelliten für das US-Militär
NRL: Naval Research Laboratory, Forschungslabor der US-Marine

▷ geht die exzentrische Ellipsenbahn allmählich in eine kleinere, fast kreisförmige Bahn über. Das Raumfahrzeug benötigt dann nur noch bescheidene elektrodynamische Kräfte, um alle vier großen Jupitermonde zu besuchen – von Kallisto, dem äußersten, bis zu Io, dem innersten. Da Kallistos Bahnperiode rund einen halben Monat beträgt, dauert die ganze Rundreise weniger als ein Jahr.

Für die Heimfahrt kehren die Flugkontrolleure den Prozess um. Sie aktivieren das elektrodynamische Seil jetzt in der Apoapsis, die außerhalb der stationären Umlaufbahn liegt, um Schub und Nutzenergie zu erzeugen. Durch Wiederholen dieses Vorgangs wird schließlich auch die Periapsis über die stationäre Umlaufbahn hinaus verschoben. Nun kann auch dort – praktisch umsonst – Schub erzeugt werden, um insbesondere die Höhe der Apoapsis immer mehr zu steigern.

Ein letzter Schub stößt das Raumfahrzeug endlich ganz aus der Umlaufbahn und bringt es auf Kurs zurück zur Erde. Die gesamte Energie für diese Manöver – und zusätzliche elektrische Nutzenergie – wurde durch Anzapfen der Jupiter-Rotation gewonnen. Indem das Raumkabel auf diese Weise Treibstoff und Energie spart, reduziert es die Kosten einer Jupiter-Mission drastisch.

In den letzten dreißig Jahren wurde die Raumseiltechnik zwar enorm weiterentwickelt, aber bis zur praktischen Anwendung für Umlaufbahnen um Erde, Jupiter oder anderswo sind noch mehrere Probleme zu lösen. Die Seile müssen gegen die Auswirkungen der starken elektrischen Spannungen zwischen Kabel und Ionosphäre sowie gegen die schleichende Materialschädigung im All geschützt werden. Außerdem gelingt es noch nicht, die verschiedenen Vibrationen zu beherrschen, die in elektrodynamischen Seilsystemen auftreten.

Doch all diese Hindernisse sind nicht unüberwindlich. Viele Wissenschaftler erwarten, dass in nicht allzu ferner Zukunft Raumseile echte Arbeit in Umlaufbahnen verrichten werden. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Enrico Lorenzini ist Weltraumwissenschaftler am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts). Dort leitet er seit 1995 die Forschungsgruppe der verstorbenen Raumseil-Pioniere Mario Grossi und Giuseppe Colombo.



Juan Sanmartín ist seit 1974 Professor für Physik an der Polytechnischen Universität Madrid (Spanien). Davor war er an der Princeton University und am Massachusetts Institute of Technology.

Active charging control and tethers. Von J. R. Sanmartín in: Environment Spatial: Prévention des Risques Liés aux Phénomènes de Charge. Cépaduès Éditions, 2002

Overview of future NASA tether applications. Von L. Johnson et al. in: Advances in Space Research, Bd. 24, S. 1055 (1999)

Tethers in space handbook. Von M. L. Cosmo und E. C. Lorenzini. Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Alhazen – Physik am Rande des Irrsinns

Sein merkwürdiges Tun brachte ihm den Ruf geistiger Unzurechnungsfähigkeit ein. Dabei schuf der muslimische Gelehrte Alhazen im 10. Jahrhundert mit seinen Experimenten die Grundlagen der Optik und der Astrophysik.

Von Gotthard Strohmaier

Die arabische Wissenschaft des Mittelalters gilt gemeinhin als Vermittlerin griechischer und indischer Kenntnisse an das Abendland. Dies ist gewiss richtig, stellt aber nur die halbe Wahrheit dar.

Wenn zum Beispiel Gerhard von Cremona, das bedeutendste Mitglied der im 12. Jahrhundert gegründeten Übersetzerschule von Toledo, die arabische Version des »Almagest« von Ptolemäus ins Lateinische übersetzte, so griff er damit dank der Vermittlung der Muslime auf das maßgebende astronomische Handbuch der Antike zurück. Und der vom selben Übersetzer vorgelegte lateinische »Kanon in der Medizin« des persischen Arztes Avicenna (um 980–1037) war im Wesentlichen eine geschickte Zusammenfassung der Medizin des Galen von Pergamon (129–216; SdW 1/2003, S. 84). Anderes, was originell und wegweisend war wie etwa das Lebenswerk des Gelehrten al-Biruni, hatte das Abendland hingegen nicht rezipiert – es hätte auch das Fassungsvermögen der christlichen Scholastik überstiegen (SdW 5/2001, S. 74).

In einem herausragenden Fall aber trafen Originalität und Rezeption im Abendland zusammen. Gerhard von Cremona übersetzte einen kleinen Traktat »De speculis comburentibus« (»Über Brennspiegel«). Zudem erschien – von unbekannter Hand um das Jahr 1200 mangelhaft wiedergegeben – »De aspectibus«, ein umfassendes Werk über die Probleme der Optik; 1572 wurde es in Basel unter dem Titel »Thesaurus opticus« gedruckt. Für die weitere Entwicklung des Fachs wirkte es bahnbrechend, da in ihm erstmals systematische Experimente für wissenschaftliche Untersuchungen herangezogen wurden. Beide Schriften stammten von Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haitham, für den sich in Europa die latinisierte Namensform Alhazen eingebürgert hat.

Lebensentwurf eines Einzelgängers

Alhazen wurde um 965 im südirakischen Basra geboren. Er hinterließ zwar eine Autobiografie, doch verriet er darin nichts über seine äußeren Lebensumstände, sondern schilderte nur seinen intellektuellen Werdegang. Er bekannte, wie er sich von der Vielfalt der religiösen Lehrmeinungen abgestoßen fühlte und dass er die Wahrheit nur dort zu finden glaubte, wo sinnliche Erfahrung und ihre rationale Widerspiegelung zusammengehen – am vorzüglichsten in den Werken des Philosophen Aristoteles.

Weiter schrieb er: »Ich war so, wie Galen im siebenten Buch seines Werkes ›Über die therapeutische Methode‹ seinen Schüler anredet: ›Ich weiß nicht, wie es sich bei mir seit meiner Jugend ergab, du magst es einen wunderbaren Zufall nennen, du magst es eine göttliche Eingebung nennen, du magst es Irrsinn oder wie auch immer nennen, dass ich die Masse der Leute verachtete und gering schätzte und mich nicht um sie kümmerte und die Liebe zur Wahrheit und den Erwerb des Wissens erstrebte und dass es bei mir feststand, dass der Mensch nicht Besseres von dieser Welt erwerben kann und nichts in einer größeren Nähe zu Gott steht als diese beiden Dinge.‹«

Nicht zufällig ist die Anlehnung an eine antike Autorität, den Arzt Galen, den auch Nichtmediziner wie Alhazen eifrig studierten. Typisch für einen mittelalterlichen Intellektuellen im Islam ist auch die elitäre Haltung gegenüber den gewöhnlichen Sterblichen. Die Formulierung »größere Nähe zu Gott« hat der christlich-arabische Übersetzer Hunain ibn Ishaq in Galens Text hineingebracht; das griechische Original ist in dem Punkt nichtssagend. Aber das Stichwort »Irrsinn«, von dem antiken Arzt nur als rhe-

IN KÜRZE

- Der muslimische Gelehrte **Ibn al-Haitham** – im Abendland als **Alhazen** bekannt geworden – legte vor tausend Jahren das Fundament der modernen Optik.
- Als erster Forscher führte Alhazen **systematische Experimente** durch – 600 Jahre vor Galilei, der gemeinhin als Begründer der Experimentalphysik gilt.

torische Floskel eingefügt, sollte in Alhazens Leben eine ernsthafte Rolle spielen.

Von einer Beamtenlaufbahn, die man für ihn vorgesehen hatte und in der er es bis zum Amt eines Wesirs brachte, zog sich Alhazen durch einen Trick zurück: Er legte, wie ihm später nachgesagt wurde, Merkmale geistiger Unzurechnungsfähigkeit an den Tag. Fortan widmete sich der Gelehrte der philosophischen und naturwissenschaftlichen Schriftstellerei, zunächst in seiner Heimatstadt, später in Bagdad sowie im persischen Ahwaz. Die Liste seiner mathematischen Schriften ist eindrucksvoll. In ihnen behandelt er Kegelschnitte, die Quadratur des Kreises, die Dreiteilung des spitzen Winkels und die Konstruktion eines Siebenecks in einem Kreis. Auch befasste er sich mit praktischer Mathematik für die Bedürfnisse der Geschäftsleute und mit der Bestimmung der »qibla«, der für Muslime obligatorischen Aufstellung beim Gebet in Richtung Mekka, was eine Aufgabe der sphärischen Trigonometrie war.

Da es keine Universitäten mit besoldeten Lehrstühlen für weltliche Fächer gab, brauchte ein Mann wie Alhazen, um in Muße arbeiten zu können, die Anbindung an einen Hof – oder irgendeinen ruhigen Verwaltungsposten, wie er ihn aber gerade aufgegeben hatte. Da erreichte ihn aus Ägypten ein ehrenvoller Ruf. Alhazens Äußerung, es müsse doch möglich sein, den Nil zu regulieren, war dem dort regierenden Kalifen al-Hakim zu Ohren gekommen. Der Herrscher vergaß nicht, die Ernsthaftigkeit seiner Einladung mit einer mitgeschickten Summe Geldes zu unterstreichen. Alhazen wurde in der neu gegründeten ägyptischen Hauptstadt Misr al-Qahira, dem heutigen Kairo, freundlich empfangen. Nachdem er sich von den Strapazen der Reise erholt hatte, machte er sich mit einer Gruppe von Handwerkern nilaufwärts auf den Weg.

Ein unberechenbarer Kalif

Doch beim Anblick der Pyramiden und anderer monumentaler Bauten kamen dem Gelehrten erste Bedenken: Wenn die Ägypter solch Gewaltiges leisten konnten, dann hätten sie gewiss auch den Fluss längst gebändigt, sofern dies überhaupt möglich wäre. Alhazen setzte die Reise bis zu den Katarakten bei Assuan fort, wo er endgültig einsah, dass ein solches Vorhaben zwecklos sei. Er kehrte zu al-Hakim zurück, der seinen Bericht akzeptierte und ihm einen Verwaltungsposten anwies. Alhazen nahm an, jedoch nicht aus Neigung, sondern aus Angst. Denn er wusste, dass er nun nicht mehr des allerhöchsten Wohlwollens gewiss sein konnte. Um die Last des Amtes loszuwerden und sich wieder ganz seinen Studien widmen zu können, verfiel er erneut auf das Mittel, sich irrsinnig zu stellen. Der Kalif kümmerte sich selbst um den Fall, nahm Alhazens Vermögen in Verwahrung und bestellte Diener, die für ihn sorgen und ihn zugleich in seinem Hause festhalten mussten.

Eine der sympathischsten Züge der islamischen Kultur in ihrer Blütezeit war die Fürsorge für Geisteskranke, die man in besonderen Anstalten oder Abteilungen der Krankenhäuser unterbrachte. Das nützte freilich nichts, wenn der Kalif selbst auf Grund seiner Verordnungen Anlass gab, an seiner Zurechnungsfähigkeit zu zweifeln. Auf Geheiß al-Hakims mussten Musikinstrumente und Schachspiele zerschlagen werden. Frauen – mit Ausnahme von Hebammen – war das Ausgehen verboten. Die althergebrachten Speisegesetze wurden verschärft und unsinnigerweise auf Muscheln und andere Meerestiere ausgedehnt. Die Christen im Lande durften während ihrer Messe kei- ▷

Die altägyptischen Monumentalbauten – hier das Isis-Heiligtum auf der Insel Philae bei Assuan – brachten Alhazen von seinem Plan ab, den Nil regulieren zu wollen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

nen Wein mehr trinken, und selbst im Bad mussten sie zur Unterscheidung von den Rechtgläubigen ein Kreuz umgehängt tragen. Als welthistorisch bedeutend erwies sich die von al-Hakim angeordnete Zerstörung der Grabeskirche in Jerusalem, was letztlich die europäischen Christen zu einem »heiligen Krieg« provozierte.

Al-Hakim ärgerte offenbar das von den Griechisch-Orthodoxen zelebrierte Spektakel des Osterfeuers, zu dem auch Muslime strömten. Mit Hinrichtungen war er schnell bei der Hand – auch sein Onkel mütterlicherseits, ein griechisch-orthodoxer Patriarch, fiel ihnen zum Opfer. Wie Kaiser Nero in Rom ließ er in Kairo sogar einen Stadtbrand inszenieren. In al-Hakims Fall indes war der Cäsarenwahn mit einer strengen religiösen Askese verbunden; zuletzt wechselte er sogar seine Kleider nicht mehr. Als er im Jahr 1021 von einem Ausritt in die Umgebung der Stadt nicht zurückkehrte, war das Volk gern geneigt, dem Gerücht eines Attentats Glauben zu schenken. Fanatische Anhänger meinten jedoch, er sei nur entrückt worden und werde wiederkommen. Eine aus dieser Gruppe hervorgegangene Abspaltung sind die im Libanon und in Israel lebenden Drusen, die ihn noch heute für eine irdische Manifestation der Gottheit halten.

Optische Experimente

Alhazen zeigte sich nun wieder in der Öffentlichkeit, die befriedigt sah, dass er wieder normal geworden war. Er nahm sich eine bescheidene Wohnung am Tor der al-Azhar-Moschee und führte hier bis zu seinem Lebensende – er starb um 1039 – ein zurückgezogenes, sorgenfreies Leben. Sein Geld, das al-Hakim in Verwahrung genommen hatte, wurde ihm zurückerstattet. Im Übrigen lebte er von einer Beschäftigung, auf die viele damalige Akademiker zurückgreifen mussten, wenn sie nicht hungern wollten. Er schrieb Bücher ab und kopierte jedes Jahr einmal die »Elemente« des Euklid, den »Almagest« des Ptolemäus und die so genannten »mittleren Bücher«, das heißt eine Gruppe von antiken mathematischen und astronomischen Schriften, die man zwischen den beiden erstgenannten zu studieren pflegte. Er hatte eine schöne Handschrift, und kaum hatte er mit der Arbeit begonnen, als schon ein Interessent anklopfte und ihm im Voraus die fällige Summe von 150 goldenen Dinaren auf den Tisch legte.

Ägyptische Handwerker zur Zeit Alhazens waren äußerst kunstfertig. Diese Bergkristallflasche befindet sich heute im Domschatz von Halberstadt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von der Mathematik besteht eine besonders enge Verbindung zur Wissenschaft der Optik. So hatte es Qusta ibn Luqa – neben dem genannten Hunain ibn Ishaq ein weiterer christlicher Übersetzer des 9. Jahrhunderts – mit schöner Klarheit formuliert: »Die anschaulichste Wissenschaft ist die, an der Naturwissenschaft und Geometrie beide teilhaben, denn sie nimmt von der Naturwissenschaft die Sinneswahrnehmung und von der Geometrie die Beweise mit der Hilfe von Linien. Ich habe nichts gefunden, wo diese beiden Disziplinen in einer schöneren und vollkommeneren Weise vereint erscheinen als in der Wissenschaft von den Strahlen, vor allem denen, die auf Spiegeln reflektiert werden.«

Dies war vermutlich auch der Grund, warum Alhazen von der Mathematik auf das Gebiet der Optik geriet. Er schloss sich dabei eng an die »Alten« an, wie man die griechischen Autoritäten üblicherweise nannte, ging aber doch über sie hinaus, indem er mit einfachen Mitteln ihre einander widersprechenden Thesen überprüfte. Dies vollführte er nicht durch eine gelegentliche Probe aufs Exempel, was auch zuvor schon praktiziert wurde, sondern mit durchdachten Versuchsreihen, die er außerdem so genau beschrieb, dass sie jedermann wiederholen konnte. Er beschaffte sich Lampen, verschiedene Spiegel, Sehrohre, um störendes Seitenlicht auszublenden, sowie Glasblöcke und die nötigen Schmelzöfen, mit denen er ihnen die gewünschte Form geben konnte.

Wir wissen nicht, ob Alhazen mit seinen Experimenten schon in der Kavaliershaft unter al-Hakim beginnen konnte. Man kann sich aber vorstellen, wie sich die Bediensteten vielsagend anblickten, als sie in einer Reihe aufgestellte Lampen abwechselnd auf- und abblenden mussten, während der Meister in einem verdunkelten Nebenraum entzückt die Bestätigung seiner Theorie registrierte. Worum ging es dabei? Die Lampen standen quer vor einer zweiflügligen Tür zum Nebenraum, die nur mit einem schmalen Spalt geöffnet war. Die Lampen warfen Lichtflecke auf die Wand gegenüber. Die Lichtstrahlen kreuzten sich in dem Spalt, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen – auch dann nicht, wenn sie buntes Glas passieren mussten. Ihre Ausbreitung erfolgte also getrennt voneinander und geradlinig. Sie konnten, wie Alhazen in anderen Versuchen vorführte, durch eine Art Lochblende weiter verengt werden, sodass sie sich dem Ideal einer mathematischen Linie annäherten.

Jene Beobachtung übertrug er von den Lampen auf undurchsichtige Körper, die das Licht einer Lichtquelle – etwa der Sonne – reflektieren. Auch hier sandte nach seiner Theorie jeder Punkt der Oberfläche gefärbte Strahlen in alle Richtungen. Das Revolutionäre an dem Vorgehen aber war, dass die subjektive Seite der menschlichen Sehfähigkeit erst einmal ausgeblendet blieb. Das Objekt zeigte sich auf der Wand oder auf dem Schirm gegenüber der Lochblende.

Der Sehstrahl entfällt

In der Zeit vor Alhazen und auch noch nach ihm waren optische Theorien von der Vorstellung belastet, ein Sehstrahl würde vom Auge ausgehen und – ähnlich wie ein modernes Radar – die Umgebung abtasten. Der genannte Qusta ibn Luqa erklärte sogar die Ansteckung mit der im Orient verbreiteten Bindehautentzündung mit Hilfe eines solchen Sehstrahls, der von einem gesunden Auge ausgehend auf ein erkranktes trifft. Die griechischen Mathematiker waren mit diesem Konzept gut zurechtgekommen. Die Reflexion an einer spiegelnden

Fläche ließ sich ebenfalls so begreifen, dass der Sehstrahl zurückgeworfen und im gleichen Winkel zur Senkrechten wie beim Auftreffen abgelenkt wird. Auch ein kleines Experiment wie das folgende vermochte diese Vorstellung nicht zu erschüttern: Man lege eine Münze auf den Boden eines Gefäßes und bringe das Auge in eine solche Position, dass die Münze vom Rand des Gefäßes knapp verdeckt wird. Gießt man Wasser hinein, scheint die Münze nach oben zu steigen, sodass sie sichtbar wird. Das konnte man auch so verstehen, dass der Sehstrahl an der Grenze von Wasser und Luft nach unten gebrochen wird.

Alhazen blieb in seinen ersten Arbeiten noch beim Sehstrahl. Dann aber wischte er alle Theorie von einer aktiven Rolle des Auges vom Tisch, indem er es für absurd erklärte, dass unser Blick auf diese Weise gleich bis zu den Sternen reichen solle, sobald wir nur die Lider aufschlagen. Obwohl sich Alhazen auf die genaue anatomische Beschreibung des Auges durch Galen stützte, übernahm er nicht dessen Modifikation des Sehstrahlkonzepts. Die vom Gehirn zum Auge führenden Nerven enthalten in ihrer Mitte Adern, die *Vasa centralia retinae*, die Galen nahe liegend, aber falsch als hohle Gänge interpretierte, durch die ein gasförmiges Pneuma herabkomme, das sich über das Auge in die angrenzende Luft verbreite und sie zum Organ des Sehens mache. Hunain ibn Ishaq, der auch als Augenarzt wirkte, vergleicht in seinen »Zehn Abhandlungen zum Auge« die so innervierte Luft mit einem Stock, mit dem ein im Dunkeln gehender Mann sein Umfeld abtastet.

Andere, die weniger der Mathematik als vielmehr der aristotelischen Naturphilosophie verpflichtet waren wie etwa Alhazens persischer Zeitgenosse Avicenna, meinten richtiger, dass vom Objekt etwas zum Auge komme. Sie ließen die ganze Form des gesehenen Gegenstands als Farbfleck in dem durchsichtigen Medium der Luft präsent sein und in das Auge übergehen. Ein Sehstrahl war hier nicht nötig. Aber mit dem Farbfleck ließen sich die Gesetze der Reflexion und Brechung schwerlich darstellen. Alhazens linear gefasste und von jedem Punkt des Objekts ausgehende Strahlen hatten diesen Nachteil nicht.

Aber wie sollten sie im Auge ein zutreffendes Bild erzeugen? Obwohl sich Alhazen in seinem verdunkelten Nebenzimmer schon in einer Art Camera obscura befunden hatte, dauerte es noch rund 600 Jahre, bis Johannes Kepler – den Intentionen Alhazens folgend – erkannte, dass auch unser Auge eine Camera obscura darstellt, in der die Objektstrahlen, die sich in der Iris als einer Art Lochblende kreuzen, auf den Schirm der Netzhaut ihr Bild werfen. Alhazen hielt den Kristallkörper der Linse für den empfindenden Teil – und kam so um die komplizierte Frage herum, warum wir die Dinge aufrecht sehen, obwohl das Bild auf der Netzhaut auf dem Kopf steht.

Wie aber sollte man sich die Einwirkung auf das Auge denken? Es wurde von einem Bündel oder vielmehr von einem schmalen Kegel von Strahlen getroffen, dessen Spitze auf dem Objekt lag und dessen Grundfläche an das Auge grenzte. Unzählige solcher Kegel drangen von allen Punkten – und sich dabei untereinander kreuzend – auf das Auge ein. Diejenige gerade Linie, die von jedem Punkt des Objekts genau senkrecht auftreffend zum gegenüberliegenden Punkt des ge- ▷

In der islamischen Malerei fehlte die Perspektive – wie hier anhand der Miniatur »Guschtasp tötet ein Nashorn« zu sehen, die aus einer Handschrift aus dem Jahr 1605 stammt.

▷ wölbten Auges gelangt, musste herausgefiltert werden. Das gelang Alhazen nur mit einer grob mechanischen Analogie, die dennoch seinem Scharfsinn alle Ehre macht: Ein Geschoss mit mäßiger Durchschlagskraft durchdringt nur dann ein dünnes Blech, wenn es genau senkrecht auftrifft, andernfalls wird es zurückgeworfen.

Anfänge einer Astrophysik

Als fruchtbar erwiesen sich Alhazens Untersuchungen der Lichtstrahlen zudem für astronomische Probleme. Er entdeckte, dass die Brechungsgesetze auch für die Lufthülle der Erde gelten. Die Höhe der Atmosphäre berechnete er zu etwa zehn Kilometern, da er eine abrupte Grenze und nicht eine allmähliche Verdünnung annahm. Damit konnte er immerhin erklären, warum wir die Sonne noch über dem Horizont sehen, selbst wenn sie schon untergegangen sein müsste.

Ferner bewegte Alhazen ein vertracktes Problem, mit dem sich selbst heutige Experten herumschlagen: die so genannte Mondillusion. Der Vollmond scheint, wenn er gerade über dem Horizont aufgestiegen ist, sehr groß zu sein. Steht er aber sehr hoch am Himmel, wirkt er viel kleiner. Ist er demnach entlang seiner scheinbaren Bahn geschrumpft?

Alhazen erklärte das Phänomen teilweise mit einer Strahlenbrechung an der Dunsthülle über dem Erdboden. Er näherte sich aber auch der richtigen Ursache: einer Wahrnehmungstäuschung. Wie wir heute wissen, ist die Projektion des Mondes auf unserer Netzhaut stets von derselben Größe – gleich, wie hoch der Mond am Firmament steht.

In einer Abhandlung »Über das Licht der Sterne« meinte Alhazen, alle Planeten hätten ein eigenes Licht – mit Ausnahme des Mondes (der damals ebenso wie die Sonne zu den Planeten gerechnet wurde). Das Mondlicht bestimmte er korrekt als »geborgtes« Licht. Er widerlegte die landläufige Meinung, dass die Flecken auf dem Erdtrabanten Spiegelbilder der irdischen Meere seien; noch der Naturforscher Alexander von Humboldt (1769–1859) hat diese Ansicht aus dem Munde gebildeter Perser zu hören bekommen. Allerdings glaubte Alhazen nicht, dass dabei die Schatten von Unebenheiten eine Rolle spielen. Vielmehr dachte er an verschiedene Materialien einer glatten Oberfläche, die das Sonnenlicht unterschiedlich reflektierten.

Die materielle Natur der Gestirnssphären blieb den forschenden Geistern bis ins 19. Jahrhundert hinein ein Rätsel. Bedeutende Astronomen wie Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) und Carl Friedrich Gauß (1777–1855) vertraten noch eine reine Positionsastronomie: Sie befassten sich mit der Berechnung der Gestirnsbewegungen und lehnten jede Aussage über die Beschaffenheit der Himmelskörper ab. Aristoteles (384–322 v. Chr.) hatte seinerzeit und aufbauend auf Vorgänger ein kühn konstruiertes System von durchsichtigen und ineinander rotierenden Hohlkugeln entworfen. Diese trugen in sich die leuchtenden Körper der Planeten einschließlich der Sonne und des Mondes und in einer äußeren achten Sphäre die Fixsterne. Alles lag den Schalen einer Zwiebel vergleichbar dicht an dicht aneinander, denn ein Vakuum durfte es nach seiner Doktrin nicht geben.

Ein halbes Jahrtausend später hatte Ptolemäus in seinem grundlegenden Handbuch, dem »Almagest«, ein viel komplizierteres System vorgeführt. Mit diesem bekam man die charakteristischen Schleifenbahnen der Planeten, wie sie sich aus dem Blickwinkel der als unbeweglich im Zentrum des Alls gedachten Erde ergaben, recht gut in den Griff. Man erreichte dies durch ein sinnreiches System von Kreisbewegungen: Auf der Peripherie eines sternlosen Trägerkreises war ein kleinerer Kreis, ein so genannter Epizykel, montiert, der wiederum das leuchtende Gestirn trug – sofern er nicht als weiterer Trägerkreis für einen neuen Epizykel herhalten musste.

Nun ist aber die Geschwindigkeit der Planeten auf ihren tatsächlichen – und seit Kepler so definierten – Ellipsenbahnen nicht konstant. Deshalb musste ein weiterer Kunstgriff herhalten, um eine Gleichmäßigkeit zu bewahren, wie sie allein für die himmlischen Sphären angemessen schien. Irgendwo neben den Mittelpunkt eines Kreises wurde ein imaginäres »punctum aequans« gesetzt, von dem aus wenigstens die Winkelgeschwindigkeit des bewegten Himmelskörpers gleich blieb.

Philosophie contra Theologie

Als man in Spanien dem König Alfonso X. (1221–1284) – den man »den Weisen« nannte und der sich um die Rezeption der arabischen Wissenschaft sehr verdient gemacht hat – die ganze komplizierte ptolemäische Maschinerie zu erklären versuchte, soll er geäußert haben, das Ganze wäre wohl einfacher ausgefallen, wenn der Allmächtige ihn bei der Weltschöpfung zu Rate gezogen hätte. Die Realität war in der Tat auch ohne den königlichen Einspruch einfacher, und das neue Weltbild des 17. Jahrhunderts war die gelungene Synthese der Theorien von Kopernikus, Kepler und Newton.

Alhazen rang wie manche seiner Kollegen im maurischen Spanien um eine Synthese von Ptolemäus und Aristoteles. Das Problem lag darin, dass man sich die einander überschneidenden Kreise nur als rein mathematische kinematische Konstruktionen vorstellen konnte und nicht als physikalische Realität, wie es das primitive aristotelische Zwiebelschalenmodell einst gewesen war. Ptolemäus hatte sich in seinem »Almagest« noch mit einer reinen Positionsastronomie begnügt, später aber in seinen »Planetarischen Hypothesen«, die auch ins Arabische übersetzt waren, versucht, dem Ganzen eine materielle Gestalt zu geben, wobei er doch leere Räume zulassen musste.

Muslimische Philosophen entwarfen mit anderen Mitteln ein – nach ihrer Meinung – natürlicheres System, indem sie wieder zu den festen aristotelischen Kugelschalen zurückkehrten, die ohne

◀ **Alhazen stellte Lesesteine aus Glas her – damit gilt der muslimische Gelehrte als Erfinder der Lupe.**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Titelkupfer der gedruckten lateinischen Ausgabe von Alhazens »Thesaurus opticus« zeigt die legendären archimedischen Brennspiegel, mit denen die Verteidiger von Syrakus angeblich römische Schiffe in Brand setzten.

Zwischenräume aneinander liegen. Auch das war zum Scheitern verurteilt. Denn wie wollte man dann beispielsweise erklären, dass der Mond bei der Konjunktion mit der Sonne dieser bald näher, bald ferner war? Dieser Sachverhalt macht sich bei Sonnenfinsternissen bemerkbar, die je nach scheinbarem Monddurchmesser ringförmig oder total sein können.

Das Dilemma schien frommen Leuten Recht zu geben, die es überhaupt als Vermessenheit ansahen, in die Geheimnisse der Welt jenseits des Mondes eindringen zu wollen. Johannes von Damaskus (etwa 700–753), der letzte bedeutende Dogmatiker der östlichen Reichskirche, der in der Finanzverwaltung der Omaijadenkalifen tätig war, hatte sich in diesem Sinne geäußert. Und darin folgten ihm islamische Theologen wie der einflussreiche Ibn Qayyim al-Dschausiyya, der im 14. Jahrhundert ebenfalls in Damaskus predigte. Auf der anderen Seite aber war für Christen und Muslime – im Unterschied zu den heidnischen Griechen – auch klar, dass die Gestirne nur unbeseelte Geschöpfe Gottes sein können. Warum also sollte man nicht versuchen, ihre Mechanismen zu begreifen?

In diesem Sinne hat Alhazen in einer Schrift »Über den Aufbau der Welt« versucht, ein ptolemäisches Modell als physikalische Realität und ohne leeren Raum zu konstruieren. Das ergab ein überaus kompliziertes Gebilde mit einem kreuzungsfreien Verkehr in ringförmigen Tunnelröhren. Es musste im Rahmen des Geozentrismus letztlich unbefriedigend ausfallen, aber es hat – um 1140 von Hermann von Kärnten auf Lateinisch in Umlauf gebracht – die schöpferische Unruhe mit inspiriert, die schließlich im Okzident zum neuen heliozentrischen Weltbild führte.

Das gesellschaftliche Umfeld

Auch in den muslimischen Ländern war das Werk verbreitet, was vielleicht dem Umstand geschuldet war, dass es ohne mathematische Berechnungen auskam. Gleichwohl war es nicht für alle eingängig. In Bagdad kam es Anfang des 13. Jahrhunderts zu einer öffentlichen Bücherverbrennung. Ein sich orthodox gebärdender Eiferer las einer versammelten Menge schlimme Dinge vor, etwa ein Gebet an den Planeten Saturn, um das Machwerk anschließend mit theatralischer Geste auf den Scheiterhaufen zu werfen. Als die Reihe an Alhazens Schrift »Über den Aufbau der Welt« kam, schlug er eine Abbildung der Gestirnssphären auf und deklamierte dazu: »Das ist das große Unheil und das gefühllose Schicksal und das blinde Verhängnis!« Auch dieses Werk landete im Feuer.

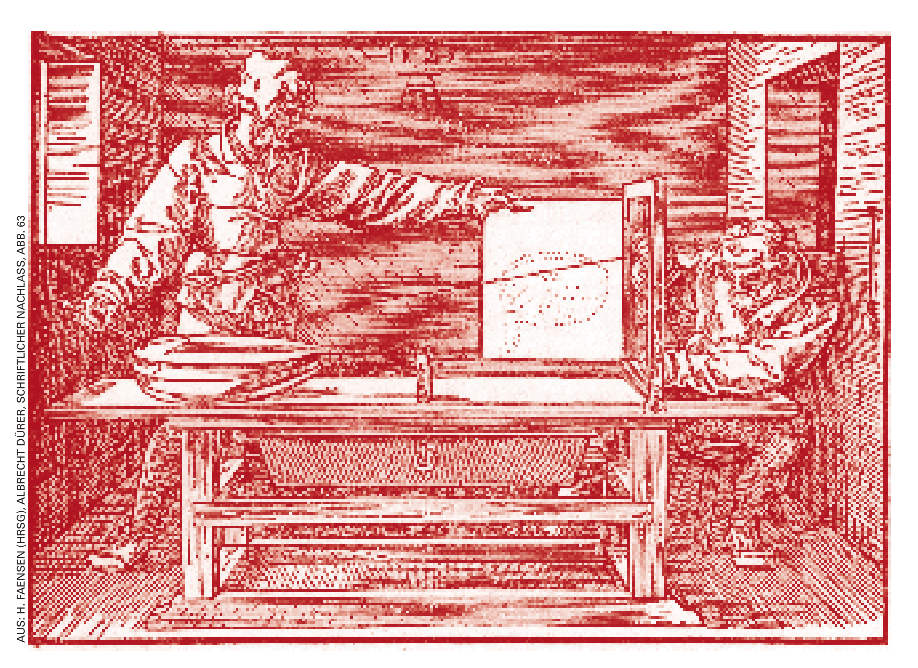
Die exakten Wissenschaften dominierten das öffentliche Leben nicht so wie heute. Beargwöhnt existierten sie am Rande, waren doch ihre Vertreter meist mit den verhassten Regierungen verbunden, die dem Volk zu hohe Steuern auferlegten und es hinter den Mauern ihrer Paläste mit dem Religionsgesetz nicht so genau nahmen. Es ist aber keineswegs so, dass die Entwicklung bald zum Stillstand kam und aufhörte, nachdem sich mit den lateinischen Übersetzungen ein Übergang in die westeuropäische Scholastik abgezeichnet hatte; denn was schadet es heute unseren Universitäten, wenn bei uns arabische Studenten lernen und wissenschaftliche Literatur in die muslimischen Länder exportiert wird?

Am Nachleben Alhazens lässt sich zeigen, dass manche seiner Ausführungen von späteren muslimischen Gelehrten aufgegriffen wurden, so von dem persischen Astronomen Kamal ad-Din al-Farisi (1236–1311), der Alhazens Optik kommentierte und in einem Anhang neue und bessere Erklärungen zur Entstehung des Regenbogens und anderer Phänomene vorlegte.

In der erwachenden bürgerlich-städtischen Kultur des christlichen Westeuropas boten die neu gegründeten Universitäten gute Möglichkeiten, all die Anregungen zu verarbeiten, die aus dem arabischen Orient dank der lateinischen Übersetzungen herüberkamen – mochten diese auch manchmal unzulänglich sein und in ihrer Qualität weit hinter die griechisch-arabischen Versionen zurückfallen, wie sie Hunain ibn Ishaq und Qusta ibn Luqa im 9. Jahrhundert in Bagdad vorgelegt hatten. Aber man zögerte, sich völlig von der Doktrin des Sehstrahls zu verabschieden, leistete sie doch in mathematischer Hinsicht fast das Gleiche wie das vom Objekt ausgehende Licht Alhazens. Und musste man nicht auch zur Kenntnis nehmen, dass Avicennas viel gerühmter arabischer »Ka- ▷

non in der Medizin« in manchen Punkten hinter dem von ihm zu Unrecht geschmähten griechischen Meister Galen zurückblieb? Der Franziskaner Roger Bacon (etwa 1220–1292) war derjenige unter den Scholastikern, der Alhazens Optik am gründlichsten rezipiert und in seinen eigenen Werken verarbeitet hat. Aber auch er glaubte, die sich widersprechenden Theorien vereinen zu können, indem er Strahlen sowohl von den Objekten wie auch vom Auge ausgehen ließ. Sein Zeitgenosse und Ordensbruder Johannes Pecham bereicherte in seiner »Perspectiva communis« die Diskussion mit dem Einwand, dass Tiere auch bei Nacht sehen können. Erst Johannes Kepler hat, konsequent den Intentionen Alhazens folgend, dem Auge endgültig eine rein empfangende Funktion zugewiesen.

So ist es verständlich, dass die Maler der italienischen Renaissance – die mit frischerem Blick auf die umgebende räumliche Wirklichkeit den Gesetzen der Abbildung auf der flachen Tafel nachspürten – auch nicht konsequenter waren als die Doktoren an der Universität. Der Maler, Architekt und Kunsttheoretiker Leon Battista Alberti (1404–1472) erklärte es denn auch für den Praktiker als unerheblich, ob die Strahlen des Kegels, dessen Spitze im Auge zu denken ist, von diesem oder von den gesehenen Gegenständen ausgehen. Gesichert ist auf jeden Fall, dass Alhazen in den Diskussionen um die neue Art des Malens sehr präsent war, weil seine Schriften nicht nur in lateinischen, sondern auch in italienischen Übersetzungen kursierten. Albrecht Dürer hat auf seinen Italienreisen den dortigen Kollegen manches abgesehen und in seinen deutschen Schriften die Beherrschung der Perspektive bildlich vorgeführt (Bild oben).



AUS: H. FAENSEN (HRSG), ALBRECHT DÜRER, SCHRIFTLICHER NACHLASS, ABB. 63

Dieser Holzschnitt von Albrecht Dürer (1471–1528) aus seiner »Unterweisung der Messung« demonstriert das exakte perspektivische Zeichnen.

Brennglas und Brille

Noch in einem anderen Fall regte Alhazen eine weit reichende und nicht zu unterschätzende praktische Konsequenz seiner Forschungen an. Er hat der Brennlinse neben einem Abschnitt in seinem großen Werk über die Optik auch noch einen speziellen Traktat gewidmet. Er untersuchte darin die bikonvexe Linse sowohl in ihrer Eigenschaft als Brennglas wie auch als Vergrößerungsgerät. Damit hatte er eigentlich die Leselupe erfunden. Auf die Vermarktung seiner Entdeckung scheint er keinen Wert gelegt zu haben, obwohl er damit vielleicht noch mehr verdient hätte als mit dem Kopieren von Handschriften.

Sein großer antiker Vorgänger Archimedes (um 287–212 v. Chr.) soll jeden Gedanken an eine nutzbringende Verwertung der Mathematik als banausenhaft zurückgewiesen haben. Die volkstümliche Legende hat ihm nichtsdestoweniger die Konstruktion wunderbarer Kriegsmaschinen zugeschrieben und schließlich auch die Erfindung von weit reichenden Brennspiegeln. Mit denen soll er bei der Verteidigung seiner Vaterstadt Syrakus römische Kriegsschiffe über eine große Entfernung in Brand gesetzt haben.

Fassbar wird die Legende in einer falschen Übersetzung von Galens Traktat »Über die Mischungen«. Dort spielt der griechische Arzt auf eine Art von chemischen Brandbeschleunigern an, die auf die feindlichen Schiffe geschleudert wurden. Der Übersetzer Hunain ibn Ishaq aber gab den griechischen Ausdruck »pyreia« als »Brennspiegel« wieder, was so in die lateinische Version des Gerhard von Cremona einging. In dem Titelkupfer der gedruckten lateinischen Ausgabe von Alhazens Optik ist der unwahrscheinliche Vorgang bildlich dargestellt (Bild auf S. 95), der Text bietet dafür aber keine Anhaltspunkte.

Das europäische Mittelalter war an der praktischen Verwertbarkeit der Wissenschaft über alle Maßen interessiert. Der englische Theologe und Naturphilosoph Roger Bacon, von seinen Zeitgenossen »Doctor mirabilis« genannt, träumte in seinem »Opus tertium« bereits von Schiffen ohne Ruderer, von Wagen ohne Zugtiere und sogar von Flugapparaten, die mit künstlichen Flügeln in der Luft schlagen wie ein Vogel. In seinem »Opus maius« von 1267 erwähnt er weniger fantasievoll und unter Anlehnung an Alhazen, dass Kugelsegmente gut für alterssichtige Leute seien.

Einem unbekannten Tüftler gelang dann wenig später die Herstellung flacher und leichter Gläser, die man dicht vor die Augen platzieren konnte. Der Dominikanermönch Giordano da Rivalto erwähnte im Jahre 1300 in einer Predigt in Florenz beiläufig das epochale Ereignis: »Es ist noch nicht zwanzig Jahre her, dass die Kunst der Verfertigung von Brillen, die besseres Sehen vermitteln, eine der nützlichsten Künste der Welt, erfunden wurde. Ich habe selbst denjenigen gesehen, der sie erfunden und zuerst fertigte, und mich mit ihm unterhalten.«

Augengläser wurden bald zu einem so gewöhnlichen Gebrauchsgegenstand, dass man sie auf Tafelbildern selbst älteren Personen der biblischen Geschichte auf die Nase setzte (Bild rechts oben).

Unter den Bohlen des Chorgestühls des Klosters Wienhausen in der Lüneburger Heide fand man 1953 neben anderen interessanten Kleinigkeiten einige

Brillen mit Holzfassungen. Sie waren dort hineingefallen, ohne dass man es für nötig hielt, deswegen die Bretter aufzuheben. Brillen müssen also früher schon recht preiswert gewesen sein.

Derlei Sehhilfen wurden sogar zu einem europäischen Exportschlager für die muslimischen Länder. Der persische Dichter Dschami (1414–1492), der im afghanischen Herat starb, beklagt in der Einleitung zu seinem Epos »Salman und Absal«, das er im hohen Alter verfasste, seine Sehkraft sei so schwach geworden, dass ihm nun nicht einmal mehr die »fränkischen Gläser« helfen könnten. Damit meint er die Brille und nicht etwa eine Leselupe, denn er spricht im Zusammenhang in poetischer Umschreibung von vier Augen, also von zwei zusätzlichen runden Gebilden.

Es ist ein Kennzeichen aller schriftlichen Zeitzeugnisse, dass über das Selbstverständliche selten berichtet wird. Erst wenn sich jemand über sein Fehlen beschwert, bekommen wir einen indirekten Hinweis auf die normalen Verhältnisse. Der Export der Fertigprodukte drang also bis ins muslimische Afghanistan vor, nicht jedoch ihre Herstellung. Das geschah dann weiter östlich in China und Japan. Aus diesem Umstand erhält man ein Indiz für die wirtschaftliche Rezession der islamischen Länder, die schon im späten Mittelalter einsetzte, als die orientalischen Basare von billigen europäischen Textilien, Glaswaren und Papier überflutet wurden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Lesender Apostel mit Nietbrille: Das Tafelbild vom Flügelaltar des Konrad von Soest in der Stadtkirche im hessischen Bad Wildungen aus dem Jahr 1403 zeigt eine praktische Anwendung von Alhazens Studien.

Kronzeuge für den Fundamentalismus?

Mit dem wachsenden ökonomischen Ungleichgewicht zwischen dem »Frankenland« und den islamischen Ländern hängt es auch zusammen, dass die nächsten großen Durchbrüche in der Naturwissenschaft diesseits des Mittelmeeres erzielt wurden. Erinnert sei nur an Johannes Kepler oder an Galileis Konstruktion eines Fernrohrs, mit dem er, über Alhazen hinausgehend, die Phasen der nicht selbst leuchtenden Venus und die Unebenheiten der Mondoberfläche feststellte. Die rein intellektuellen Potenzen waren in der islamischen Zivilisation ebenfalls vorhanden, wie das Beispiel Alhazens zeigt.

Aber die von dem experimentierfreudigen Gelehrten ausgehende Tradition ist in den muslimischen Ländern abgerissen, und es waren europäische Philologen des 19. Jahrhunderts, die nicht nur die ägyptischen Hieroglyphen entzifferten und damit den Ägyptern einen Beitrag für ihren Nationalstolz lieferten, sondern auch darangingen, aus den noch vorhandenen arabischen Handschriften das Bild der Glanzepoche der arabisch-islamischen Kultur zu entwerfen und ihren wissenschaftlichen Akteuren die verdiente Würdigung zuteil werden zu lassen. Sie konnten schließlich auch feststellen, dass der Alhazen der lateinischen Übersetzungen mit dem Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haitham der mittelalterlichen arabischen Biografen identisch ist.

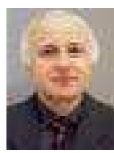
Unter muslimischen Wissenschaftshistorikern der Gegenwart, die sich nun zahlreich und in erfreulicher Weise an den Forschungen beteiligen, macht sich leider eine Tendenz bemerkbar, die vergangenen Leistungen damit zu erklären, dass sie vom Koran und der Scharia inspiriert gewesen seien. So erklärte Muzaffar Iqbal – Präsident des kanadischen »Center for Islam and Science« – kürzlich, Alhazens Verarbeitung seiner griechischen Vorgänger sei »purely Islamic recasting«, also eine »rein islamische Neugestaltung«.

Aber hören wir, was der Koran zu einem optischen Thema zu sagen hat: »Hast du nicht gesehen, wie Gott den Schatten lang werden ließ? Wenn er gewollt hätte, hätte er ihn stehen lassen. Danach haben wir die Sonne auf ihn hinweisen lassen, dann haben wir ihn langsam zu uns eingezogen.«

Alhazen hat jedoch, anstatt sich darum zu bemühen, den Versen der Sure 25, 45f. einen vernünftigen Sinn abzugewinnen, nur an die griechischen Vorgänger angeknüpft, nachdem er – wie er in seiner Autobiografie bekennt – von der Vielfalt der religiösen Lehrmeinungen irre wurde und seinen Seelenfrieden im Studium der Werke des Aristoteles fand. Sein Lebenswerk hat mit dem Islam so viel und so wenig zu tun wie das eines Euklid, Archimedes, Ptolemäus oder Galen mit dem griechischen Heidentum.

In die historische Konstruktion einer spezifisch islamischen Wissenschaft, die vorgeblich wegen des verderblichen Einflusses des Westens untergegangen sein soll, passt auch ein weiteres Detail: Gelehrte wie Hunain ibn Ishaq und Qusta ibn Luqa werden oft als Vertreter dieser islamischen Wissenschaft vorgestellt, obwohl sie sich als Christen entschieden vom Islam distanzierten. So gerät selbst Wissenschaftsgeschichte an den Rand des Irrsinns. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gotthard Strohmaier lehrt als Honorarprofessor am Seminar für Semitistik und Arabistik der Freien Universität Berlin. Bereits mehrfach hat er in Spektrum der Wissenschaft die Leistungen muslimischer Gelehrter und ihre Rezeption im europäischen Mittelalter vorgestellt.

Das Mittelalter auf der Nase. Brillen, Bücher, Bankgeschäfte und andere Erfindungen des Mittelalters. Von Chiara Frugoni, München 2003

Ibn al-Haythams Weg zur Physik. Von Matthias Schramm, Wiesbaden 1963

Islam and science. Von Muzaffar Iqbal. Aldershot, Hampshire 2002

Alhacen's theory of visual perception. Von A. Mark Smith, 2 Bände, Philadelphia 2001

Encyclopedia of the History of Arabic Science. Von Roshdi Rashed (Hg.), 3 Bände, London, New York 1996

Ibn al-Haytham. Von A. I. Sabra in: Dictionary of Scientific Biography, Band 6, New York 1972, S. 189

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TECHNIK

Rolf Dieter Schraft, Martin Hägele, Kai Wegener

Service Roboter Visionen

Hanser, München 2004. 223 Seiten, € 24,90

Gemeint sind nicht die Automaten, die Autos montieren oder auf vorprogrammierten Wegen die Lackspritzpistole führen. Es geht um Roboter für Dienstleistungen wie Staubsaugen, Fensterputzen oder andere, beliebig komplizierte Tätigkeiten. Wenn auch der vor Jahren erhoffte Boom ausgeblieben ist, rechnet Rolf Dieter Schraft, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart, für die Zukunft mit einer rasanten Entwicklung.

Schraft, seine Koautoren vom selben Institut sowie eine Vielzahl weiterer Autoren stellen die derzeit wichtigsten Typen von Service-Robotern kurz vor und geben Ausblicke auf weitere Entwicklungen. Hintergrundinformationen, etwa wie Roboter in ihrer Umgebung navigieren oder wie künstliche Intelligenz funktioniert, ergänzen die Darstellung.

Einsteiger sind erstaunt ob der vielen, zum Teil bizarren Robotertypen, darunter Gänse hütende, Schnecken sammelnde oder Gurken erntende Blechkameraden. Im Laufe der Lektüre bekommt man eine Vorstellung davon, wie schwierig die technische Umsetzung selbst einfachster Funktionen ist: Einen Korridor entlang von einer Tür zu anderen zu laufen ist für uns ein Kinderspiel, für einen Roboter jedoch ein überaus kompliziertes Unterfangen.

Das Buch ist einsteigerfreundlich, übersichtlich, ansprechend bebildert und im Wesentlichen leicht verständlich geschrieben. Diese angenehmen Eigenschaften gehen natürlich zu Lasten der fachlichen Details. Dennoch: Der Überblick, den das Werk bietet, und seine gelungene Bebilderung machen es zur lohnenden Anschaffung – für Einsteiger und interessierte Amateure sowieso, aber vielleicht auch für Experten.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Astronomie Heute« in Heidelberg.





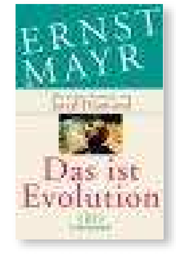
»Armar« vom Forschungszentrum Informatik der Universität Karlsruhe soll Objekte und Personen identifizieren und entsprechend reagieren können. Oben ein automatischer Rasenmäher

BIOLOGIE

Ernst Mayr

Das ist Evolution

Aus dem amerikanischen Englisch von Sebastian Vogel.
C. Bertelsmann, München 2003. 378 Seiten, € 23,90

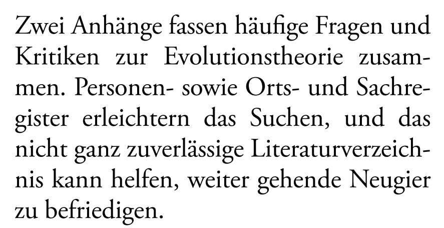


Für ein Übersichtswerk über ein derart umfangreiches Gebiet würde ein Verlag üblicherweise verschiedene kompetente Autoren zusammenspannen. Der heute 100-jährige Ernst Mayr hat es ganz allein geschrieben und damit ein einzigartiges Werk aus einem Guss geschaffen.

Ernst Mayr, geboren in Kempten im Allgäu und emeritierter Professor am Museum of Comparative Zoology in Harvard, hat als Beobachter und Sammler begonnen und alle Folgeschritte zum Ornithologen, Systematiker, Theoretiker und Bio-Philosophen selbst durchlaufen. Es geht ihm um die Erklärung der genetischen Evolution mit all ihren Fassetten, ein Vorhaben, für das er sich seit Langem als kompetent erwiesen hat.

Das Buch ist allgemein verständlich geschrieben. Die rund 200 Unterkapitel in 12 Hauptkapiteln sind so lapidar gehalten wie der Buchtitel: Kurz und präzise werden die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Gesichtspunkte abgehandelt, die für die Evolutionslehre eine Rolle spielen. Es ist eine leichte Betonung derjenigen Fragen zu spüren, welche in Amerika im Streit zwischen Evolutionsforschern und kreationistischen Evolutionsgegnern gerade wieder neu aufgelegt werden.

41 Abbildungen, 19 Kästen, 8 Tabellen und ein Glossar erklären Details. Zwei Anhänge fassen häufige Fragen und Kritiken zur Evolutionstheorie zusammen. Personen- sowie Orts- und Sachregister erleichtern das Suchen, und das nicht ganz zuverlässige Literaturverzeichnis kann helfen, weiter gehende Neugier zu befriedigen.

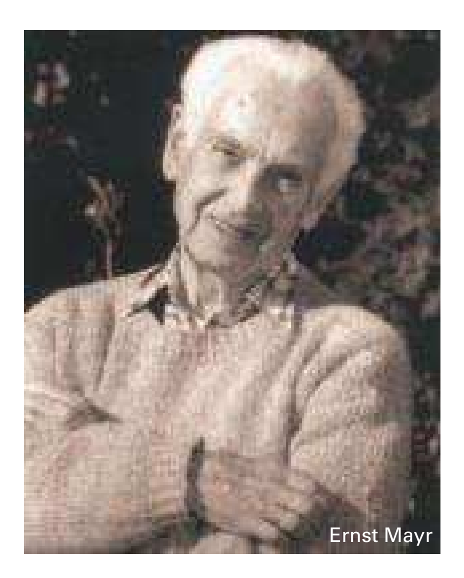


Die immer wieder umstrittene Frage, welche lebendige Einheit Objekt der natürlichen Selektion ist, wird klar beantwortet: Selektion – also das nichtzufällige Überleben – bezieht sich auf das Individuum mit seinen Fortpflanzungschancen. Nichtzufälliges Überleben gründet auf Eigenschaften, die von den Genen programmiert wurden. Da in folgenden Generationen nur Gene, nicht aber Individuen identisch wieder auftreten, spielt sich Evolution an Genen und ihren Programmen ab; diese müssen aber von Individuen zu Markte getragen werden und sich in ihnen dem Tauglichkeitstest der Selektion stellen. Wegen einiger durchschlagend ungeeigneter genetischer Ei-

genschaften kann ein Individuum, einschließlich seiner anderen, durchaus tauglichen genetischen Eigenschaften, von der Fortpflanzung ausgeschlossen bleiben. Welche Umwelt- und sozialen Faktoren selektieren (warum immer wieder »selektionieren«?), wird eingehend erläutert.

Bei dem Umfang des Themas darf nicht verwundern, dass ich dem Altmeister in einigen wesentlichen Punkten widersprechen muss. So übergeht Mayr, wie im englischen Sprachraum üblich, weithin den für die Evolution wichtigen Unterschied zwischen ungeschlechtlicher Vermehrung (durch Zweiteilung, Knospung und Stecklinge; Klonen) und eingeschlechtlicher Vermehrung (durch Jungfernzeugung oder Parthenogenese; so entstehen zum Beispiel bei Bienen und anderen Hautflüglern die Männchen). Neuerdings heißt beides »asexual« und wird auch einheitlich als »ungeschlechtlich« übersetzt. Aber: Zur Parthenogenese sind im Gegensatz zur ungeschlechtlichen Vermehrung Gameten (Eizellen) erforderlich, und diese Variante geschlechtlicher Vermehrung erzeugt nicht durchweg genetisch identische Organismen: Drohnen stimmen weder im Körperbau noch im Verhalten mit ihrer Mutter überein und sind auch untereinander genetisch nicht identisch.

Alle Formen der Artbildung setzen den »Erwerb wirksamer Isolationsmechanismen« voraus. Doch dass bei Vögeln die geografische Trennung der einzig vorkommende Isolationsmechanismus sei, wird von den brutparasitischen afrikanischen Witwenvögeln (Viduinae) widerlegt, die als Nestlinge den Gesang ihrer jeweiligen Prachtfinken-Wirtseltern erlernen, später daran sowohl ihren Brutwirt als auch ihren Paarungspartner erkennen und so Abstammungslinien mit reproduktiver Isolation bilden, die durch den Gesang herbeigeführt wird.


Ernst Mayr

Wirtspflanzen-Spezifität wird epigenetisch durch Prägung erworben, die Gesangsspezifität der Witwenvögel durch soziales Lernen und Tradition. Diese Formen des Lernens fehlen im Buch, spielen dann aber unter der Hand eine wichtige Rolle in der Evolution des Menschen, nicht nur für seine Werkzeugkultur, sondern vor allem bei der Entstehung von Ethik durch »Lehren eines Religionsstifters oder Philosophen«. Das impliziert Traditionen, also »die Weitergabe kultureller Informationen«, die beim Menschen ein zentraler Aspekt des Lebens ist.

Die kulturelle Evolution bestimmter Fähigkeiten, die den Menschen einzigartig im Tierreich macht, kann verschiedene kulturbestimmte Abstammungslinien zur Folge haben, wenngleich sie mangels tragfähiger Isolationsmechanismen nicht zur Aufspaltung in verschiedene Arten geführt hat. Kulturelle Evolution durch Traditionsbildung kann die Evolution – den genetischen Wandel aller Individuen in einer Population – maßgeblich beeinflussen. Das lässt Mayr unerwähnt, obwohl er Verhalten als Schrittmacher der Evolution behandelt: Eine (kulturell entstandene) Vorliebe für ein neues Nahrungsmittel lässt einen neuen Selektionsdruck entstehen, der dann evolutionären Wandel nach sich zieht.

Dieses zunehmend wichtiger werdende Thema kulturell-genetischer Koevolution lässt Ernst Mayr auch in Kapitel 12 »Aktuelle Themen der Evolutionsforschung« unberücksichtigt. Es wäre für eine vollständige »Standortbestimmung der Evolution zu Beginn des 21. Jahrhunderts«, die der Klappentext verheißt, zu ergänzen.

Bei aller Kritik: Dies ist ein sehr empfehlenswertes Lehrbuch für wissbegierige Laien und auch für denkerisch begabte Spezialisten aus anderen Wissenschaftszweigen, die, vielleicht als Ethikräte in Regierungskommissonen berufen, noch nicht ganz verstanden haben, wie biologische Evolution abläuft.

Wolfgang Wickler

Der Rezensent ist kommissarischer Leiter des Max-Planck-Instituts für Verhaltensphysiologie in Seewiesen.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Peter Pesic

Die Spione im Unendlichen

Kepler, Newton, Einstein und die Geheimnisse des Universums

Aus dem Amerikanischen von Dietmar Zimmer.
Klett-Cotta, Stuttgart 2003. 224 Seiten, € 19,50



Dieses Buch ist nicht noch ein Abriss der modernen Naturwissenschaft, etwa im Stil von Stephen Hawkings Bestseller »Eine kurze Geschichte der Zeit«, sondern eine originelle und aufschlussreiche Anekdotensammlung über die Begründer der empirischen Naturforschung. Spektrum-Leser kennen den Autor bereits als Verfasser des Artikels »Die Identität der Quanten« (Januar 2003). Er ist studierter Physiker und Konzertpianist, Insider und Außenstehender zugleich, was ihm einen ziemlich schrägen, aber für den Leser ergiebigen Blickwinkel verschafft.

Was für Menschen setzten in der Renaissance die Samenkörner, aus denen die gewaltigen Bäume der empirischen Wissenschaften aufwuchsen? Pesic zufolge waren sie alles andere als trockene Rechenknechte, engstirnige Federfuchser, sinnenfeindliche Stubengelehrte. Eine geradezu erotische Neugier, der Natur ihre Geheimnisse zu entlocken, trieb sie hinaus ins Unbekannte. Die Welt erschien ihnen als Labyrinth, in dessen Zentrum der Schlüssel zur Naturbeherrschung liegt, oder als rätselhaftes Kryptogramm, das nur dem mathematisch Kundigen den Klartext offenbart.

Francis Bacon (1561–1626), Johannes Kepler (1571–1630) und Isaac Newton (1642–1727) waren nicht nur kühne Entdecker, sondern auch geschickte Agitatoren. In ihren Schriften arbeiteten sie mit allen rhetorischen Tricks, um das Publikum für die neue Wissenschaft zu gewinnen. Bacon entwirft in seinem »Neu-Atlantis« ein utopisches Gesellschaftsmodell, in dem der Verstand regiert – was eine großzügige Deregulierung sexueller Konventionen durchaus einschließt. Kepler lässt wie ein heutiger Krimiautor den Leser zappeln und an allen Wegen, Irrwegen und Sackgassen seiner kosmologischen Überlegungen teilhaben, um erst am Ende die Auflösung – das heliozentrische System mit elliptischen Planetenbahnen und den drei Kepler'schen Gesetzen – zu präsentieren.

Newton wiederum treibt mit seinen Lesern ein Versteckspiel, mit dem Ziel, sich durch Schwerverständlichkeit gegen zeitgenössische Kritiker zu schützen. Der Begründer der klassischen Physik schrieb umfangreiche Geheimtexte über Alchimie, versuchte sich in nächtlichen Experimenten an »Kopulationen« von Gold und Quecksilber und vertrat eine ketzerisch-fundamentalistische Auslegung der Bibel, die ihn Kopf und Kragen hätte kosten können. Seine Erkenntnis, dass der Fall eines Apfels und der Weg der Planeten demselben Gesetz gehorchen, wurde ihm durch die astrologisch-alchimistische Überzeugung nahe gelegt, der Lauf der Gestirne bestimme letztlich alle irdischen Vorgänge.

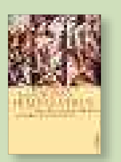
Auch bei Albert Einstein sucht Pesic in der intellektuellen Biografie nach privaten Motiven für ein lebenslanges Streben nach Naturerkenntnis. Ein Schlüsselerlebnis war die frühe Bekanntschaft mit Euklids Geometrie, die den gesamten Raum der Erfahrung auf wenige Axiome zurückführt. Später kam die Berührung mit den Schriften des Philosophen Spinoza hinzu, dessen strengen Determinismus und Pantheismus Einstein als geistesverwandt empfand. Bekanntlich kritisierte Einstein später die Quantentheorie als unvollständig: Eine Theorie, die nur Wahrscheinlichkeitsaussagen zulässt und die Frage, wie ein nicht beobachtetes Mikroobjekt »an sich« beschaffen sei, für sinnlos erklärt, widersprach seinem Wissenschaftsverständnis. Bis zu seinem Tod bemühte Einstein sich um eine einheitliche Feldtheorie, welche die unendliche Vielfalt der Natur nach Art der euklidischen Axiome auf einige abstrakt-mathematische Aussagen reduzieren sollte.

Den Studenten begegnet die Physik heute als fertige Formelsammlung, die experimentelle Daten zusammenfasst. Bei Pesic lernt der Leser die sinnlichen Antriebe kennen, die Menschen veranlasst haben, als neugierige Spione in das Labyrinth der Natur einzudringen.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Peter Borscheid

Das Tempo-Virus

Eine Kulturgeschichte der Beschleunigung

Campus, Frankfurt am Main 2004, 409 Seiten, € 24,90

Der Historiker Peter Borscheid stellt in dieser faszinierenden Kultur- und Technikgeschichte dar, wie über die Jahrhunderte das Beschleunigungsprinzip das gesamte Alltagsleben okkupierte und auch vor der Evolution des menschlichen Organismus nicht Halt machte. Wie es in die Welt gekommen ist, kann Borscheid nicht schlüssig erklären. Aber er arbeitet präzise heraus, über welche Wege und Irrwege es sich ausgebreitet hat, um sich am Ende überall durchzusetzen.

Entgegen dem Titel hält Borscheid die Beschleunigung des gesellschaftlichen Lebens nicht für eine Krankheit, sondern für eine große Errungenschaft. Er protestiert nur dagegen, allem und jedem dieselbe Zeitordnung aufzwingen zu wollen.

Aus der Rezension von Frank Ufen

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	4
Vermittlung	4
Verständlichkeit	5
Lesespaß	4
Preis/Leistung	4
Gesamtpunktzahl	21

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

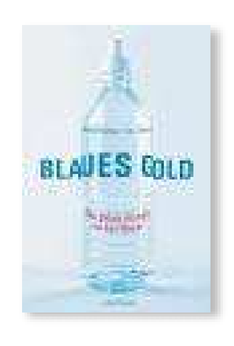
POLITIK

Maude Barlow und Tony Clarke

Blaues Gold

Das globale Geschäft mit dem Wasser

Aus dem kanadischen Englisch von Gabriele Gockel, Thomas Wollermann und Bernhard Jendricke, Kollektiv Druck-Reif. Antje Kunstmann, München 2003. 340 Seiten, € 24,90



Das Cover der deutschen Ausgabe ist so einfach wie genial. Eine Flasche Wasser symbolisiert das lebensnotwendige Nahrungsmittel, aber auch das boomende Geschäft. Mit einem Anstieg von 2,5 auf 22,3 Milliarden Liter ist der weltweite Konsum von Flaschenwasser zwischen 1980 und 2000 regelrecht explodiert. Allem Anschein nach leben wir im Überfluss, und dass die klaren Quellen versiegen könnten, kommt uns nicht in den Sinn. Doch es ist nur eine Frage der Zeit, so die Autoren, bis das Süßwasser zur Neige geht.

Glaubt man Maude Barlow, der Vorsitzenden der größten Bürgerrechtsorganisation Kanadas, und Tony Clarke, dem Direktor des Polaris Institute of Canada, so sind die durch den Menschen hervorgerufenen Schäden im Wasserhaushalt kaum noch zu beheben. Die Krise, so titelt das erste Kapitel des fast emotionalen Buchs, wird vor allem durch Verschmutzung der Umwelt, Bebauung und Begradigung natürlicher Flussläufe sowie Klimaveränderung hervorgerufen. Dadurch sinkt die Verfügbarkeit von Süßwasser pro Einwohner rapide. Die wachsende Bevölkerungszahl ist dabei noch nicht einmal berücksichtigt. Zu allem Überfluss lassen sich Landwirtschaft und Industrie nicht davon abbringen, sich einen immer größeren Schluck aus den globalen Süßwasserreserven zu genehmigen.

Spätestens bei diesem Thema fahren die beiden Kanadier ihre Geschütze auf, die sich im zweiten Teil »Politik« entladen. Den gravierendsten Einschnitt in die Versorgung mit Wasser sehen sie in den globalen Machenschaften rund um das »Blaue Gold«. Schon längst haben internationale Großkonzerne wie der Wassergigant Suez oder die Nahrungsmittelproduzenten Nestlé und Unilever erkannt, dass Wasser eine ebenso Gewinn bringende Ressource ist wie Gold oder Erdöl. Unbemerkt von der Öffentlichkeit wurden die ersten Nägel in Richtung weltweiter Vermarktung schon eingeschlagen: Im Jahr 2000 wurde der Zugang zum Wasser von Weltbank und Vereinten Nationen offiziell zum »menschlichen Bedürfnis« statt zum »Menschenrecht« deklariert. Diese unauffällige Bestimmung ermöglicht es der Privatwirtschaft, die Versorgung mit dem lebensnotwendigen Stoff allein unter kommerziellen Gesichtspunkten zu betreiben. Dass dabei vor allem wirtschaftlich schwache Länder mit geringen Niederschlägen betroffen sind, leuchtet ein. Doch die Fülle der detailliert aufgeführten Beispiele, so richtig und einprägsam sie alle sind, erschlägt den Leser. Fast möchte man auf der Stelle in die Küche stürzen, um einen Eimer Wasser als Reserve beiseite zu stellen.

Zum Glück zeigen Barlow und Clarke im anschließenden Kapitel einen »Weg aus der Krise«. Allerdings sind ihre zahlreichen Gegenmaßnahmen nicht so praktikabel wie bloßes Wassersparen. Vielmehr empfehlen sie zehn Schritte zu einer wassersicheren Zukunft, etwa die Unterstützung der Anti-Staudamm-Bewegung. Die weltweit 40000 Stauseen bedecken fast ein Prozent der Erdoberfläche und haben an die 60 Millionen Menschen von ihrer Siedlungsfläche verdrängt. Gegen die damit verbundene Armut, gegen den Rückgang der Artenvielfalt und für die Rettung natürlicher Flussläufe kämpfen mittlerweile unzählige Menschen, die aber noch kaum Gehör finden.

Solche plakativen Parolen, die »Herren des Wassers« in die Schranken zu weisen und die soziale Ungleichheit zu bekämpfen, bleiben fromme Wünsche. Ohne konkrete Adressen oder Personen, an die man sich wenden kann, bleibt der betroffene Leser allein, bleiben die sicherlich erstrebenswerten Ziele des Buchs eine Fata Morgana. Da können auch die im Buch hinten angefügte »Vertragsinitiative zum gemeinsamen Gebrauch und zum Schutz des globalen Gemeinschaftsguts Wasser« und die reichhaltige Literaturliste nicht weiterhelfen. Der einzig greifbare Hinweis ist die in der Danksagung erwähnte Website des Council of Canadians (www.canadians.org), auf der die Materialien des Blue Planet Project, einer internationalen Bürgerbewegung zum Schutz des Wassers, zu finden sind. Und es lohnt sich, dort nachzuschauen!

Nardine Löser

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Rostock.

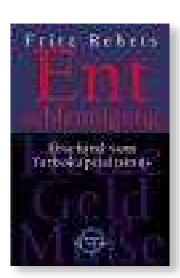
LEBENSFÜHRUNG

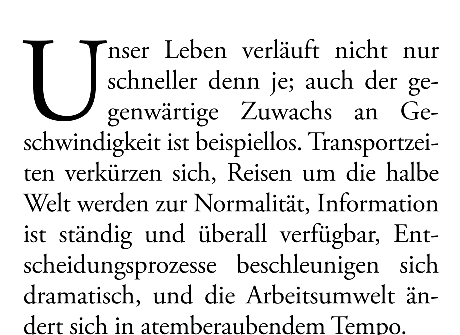
Fritz Reheis

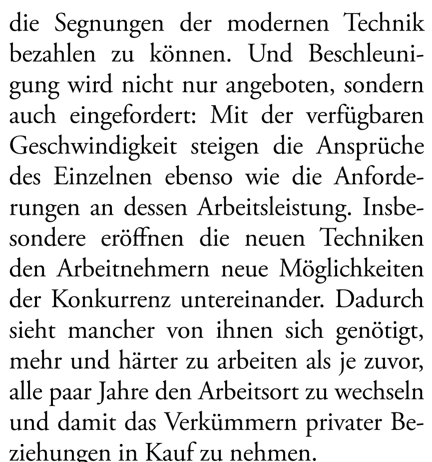
Entschleunigung

Abschied vom Turbokapitalismus

Riemann, München 2003. 320 Seiten, € 20,–







Unser Leben verläuft nicht nur schneller denn je; auch der gegenwärtige Zuwachs an Geschwindigkeit ist beispiellos. Transportzeiten verkürzen sich, Reisen um die halbe Welt werden zur Normalität, Information ist ständig und überall verfügbar, Entscheidungsprozesse beschleunigen sich dramatisch, und die Arbeitsumwelt ändert sich in atemberaubendem Tempo.

Nachdem so viele Prozesse so viel weniger Zeit erfordern, müsste eigentlich für deren Nutzer mehr Zeit übrig bleiben. Das ist aber ganz offensichtlich nicht der Fall. Einen wesentlichen Teil der eingesparten Zeit muss der Mensch in Form von Arbeitszeit wieder aufwenden, um die Segnungen der modernen Technik bezahlen zu können. Und Beschleunigung wird nicht nur angeboten, sondern auch eingefordert: Mit der verfügbaren Geschwindigkeit steigen die Ansprüche des Einzelnen ebenso wie die Anforderungen an dessen Arbeitsleistung. Insbesondere eröffnen die neuen Techniken den Arbeitnehmern neue Möglichkeiten der Konkurrenz untereinander. Dadurch sieht mancher von ihnen sich genötigt, mehr und härter zu arbeiten als je zuvor, alle paar Jahre den Arbeitsort zu wechseln und damit das Verkümmern privater Beziehungen in Kauf zu nehmen.

Der Effekt der Zeitspartechniken ist, dass kein Mensch mehr Zeit hat. Muße,

Selbstbesinnung, Seelenfriede und die Weiterentwicklung der Persönlichkeit bleiben auf der Strecke, nicht zu reden von den elementaren Freuden des Lebens. Wenn sogar das Erzbischöfliche Ordinariat in München sich zu dem dringenden Appell an die Menschen veranlasst sieht, mehr Zeit für – unter anderem – Intimität und Sexualität aufzuwenden, muss es schon schlimm um unser Seelenheil stehen.

Fritz Reheis, Gymnasiallehrer in Neustadt bei Coburg, Philosoph und promovierter Soziologe, hat in langjähriger Arbeit viele Belege für das gesammelt, was er die »Beschleunigungskrankheit der Gesellschaft« nennt. Darunter sind Kuriositäten wie der Schnell-Bestattungsunternehmer, der den Trauernden Gelegenheit gibt, binnen dreißig Sekunden formvollendet Abschied von dem lieben Verstorbenen zu nehmen. Und mit etwas gewaltsamer Argumentation gelingt es ihm auch, den Terroranschlag vom 11. September, das Massaker am Gutenberg-Gymnasium in Erfurt und die Jahrhundertüberschwemmung der Elbe als Symptome der Beschleunigungskrankheit zu deuten. Aber das darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass Reheis mit seiner Diagnose einen wesentlichen Zug moderner Gesellschaften getroffen hat.

Die Kirche rät: Mehr Zeit für Sex

Warum tun wir massenhaft Dinge, die wir eigentlich nicht wollen oder deren Folgen wir zumindest nicht beabsichtigt haben? Bei dem Versuch der Erklärung greift Reheis tief in die Kiste der fundamentalen Ursachen – und kann nicht überzeugen. Die genetische Grundausstattung des Menschen, der Kapitalismus in seiner modernen, verschärften Form (»Turbokapitalismus«) und vor allem die Institution des Zinseszinses: Diese Ursachen gibt es zweifellos, aber eben schon lange, weswegen sie kaum erklären können, warum uns die Beschleunigungskrankheit just in diesem historischen Moment befällt.

Eine andere Erklärung, die Reheis weniger pointiert vorbringt, ist profaner, aber glaubwürdiger: Jedes Mal, wenn eine neue Technik neue Möglichkeiten eröffnet, wie zum Beispiel zum gegenwärtigen Zeitpunkt, geht es zunächst den abhängig Beschäftigten (einschließlich ▷

PREISRÄTSEL

Kindergeburtstag

Von Roland Mildner

Der kleine Patrick hat seine Freunde zum Kindergeburtstag eingeladen. Seine Mutter gibt ihm 15 Euro, damit er selbst den Kuchen besorgen kann. In der Konditorei nebenan fragt ihn die Verkäuferin nach seinen Wünschen. »Ich möchte für genau 15 Euro Kuchen haben, und zwar solchen, solchen und solchen Kuchen!«, sagt Patrick. Dabei zeigt er auf drei Kuchensorten, die pro Stück 0,80 Euro, 1,– Euro und 1,10 Euro kosten.

Wie viele Möglichkeiten hat die Verkäuferin, den Kuchen zusammenzustellen, sodass Patrick von jeder der drei Kuchensorten mindestens ein Stück erhält und der Preis genau 15 Euro beträgt?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Bücher und CDs mit Soundtrack zum Film »Genesis«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. Dezember 2004, eingehen.

Lösung zu »Binäres Spielchen« (Oktober 2004)

Das kleinste Primzahlpaar, bei dem Ben gewinnt, ist 5 und 7. Dasjenige, bei welchem Marc gewinnt, ist 5 und 11. Bei der Primzahlliste 7, 11, 13, 17 gewinnt Ben.

Anhängen einer Null an die binäre Ziffernfolge zur Zahl d macht daraus die Zahl $2d$; durch Anhängen einer Eins ergibt sich $2d+1$. Das gilt auch für das Rechnen modulo einer Primzahl p: Wenn d bei der Division durch p den Rest r lässt, dann lässt $2d$ den Rest $2r$ und $2d+1$ den Rest $2r+1$, jeweils modulo p gerechnet; das heißt, wenn das Ergebnis ($2r$ oder $2r+1$) gleich p oder größer ist, muss man p subtrahieren. Zum besseren Überblick schreibt man zu jeder erzeugten Zahl ihre »Resteliste« auf, das heißt die Liste der Reste bei Division durch jede Primzahl der Primzahlliste.

Für Ben kommt es darauf an, bei seiner einzigen Gelegenheit, eine Ziffer anzuhängen, eine Null in der Resteliste zu erreichen. Marc muss folglich den Rest $r=(p-1)/2$ vermeiden, weil sonst Ben durch Anfügen einer Eins den Rest p = 0 modulo p erreichen würde.

Bei der Primzahlliste 5, 7 muss also Marc den Rest 2 für die Primzahl 5 und 3 für die Primzahl 7 verhindern. Ein aussichtsloses Unterfangen: Für die erste Eins ist die Resteliste (1, 1). Durch Anhängen einer Null wird sie zu (2, 2), durch Anhängen einer Eins zu (3, 3).

Bei der Primzahlliste 5, 11 dagegen muss Marc die Reste 2 und 5 vermeiden. Und das gelingt ihm folgendermaßen (erste Zeile angehängte Ziffer, zweite Zeile Rest modulo 5, dritte Zeile Rest modulo 11):

1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1
1	3	6	2	4	9	7	4	8	6	1

Da nun die ursprüngliche Resteliste (1, 1) wieder erreicht ist, wiederholt sich der Prozess zyklisch, und Marc kann bis in alle Ewigkeit abwechselnd Einsen und Nullen anhängen.

Bei der Primzahlliste 7, 11, 13, 17 hält Marc nur bis höchstens zu seinem 14. Zug durch, nämlich bis 10010111101000 oder 10010111101001, wonach Ben jeweils durch Anhängen einer Eins das Spiel beendet.

Die Gewinner der drei Puzzles »Kristall« sind Norbert Krämer, Mannheim; Thorsten Titzmann, Gießen; und Kurt Doppler, Unterehrendingen (Schweiz).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ der Scheinselbstständigen) an den Kragen. Bis diese einen Weg gefunden haben, ihre Interessen unter den neuen Bedingungen zur Geltung zu bringen, vergeht eben eine erhebliche Zeit.

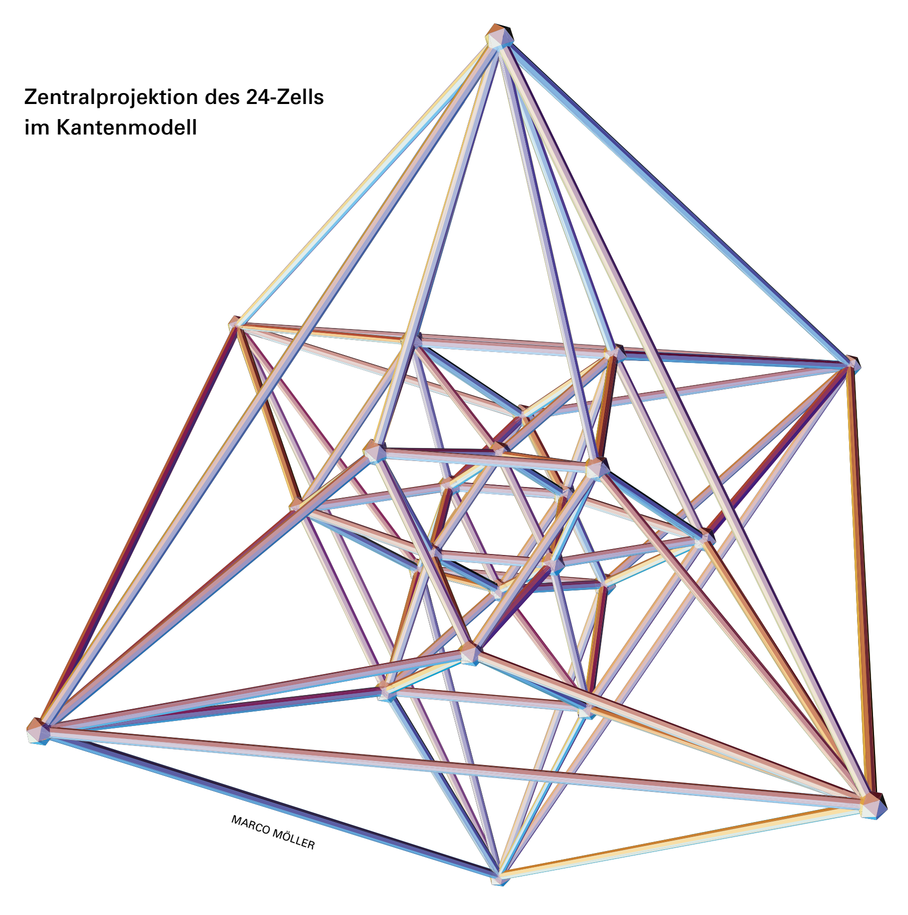
Die dritte Erklärung ist wenig schmeichelhaft, aber schmerzlich zutreffend: Wir tun nicht, was wir eigentlich wollen, weil wir nicht merken, was wir eigentlich wollen, oder nicht die Willensstärke aufbringen, nach dieser Einsicht zu handeln. Reheis erklärt einen individuellen »Ausbruch aus dem Hamsterrad« für praktisch unmöglich, es sei denn, man wäre sehr reich oder bereit, das soziale Netz zu missbrauchen. Diesen Pessimismus halte ich für stark übertrieben; aber es ist nicht einfach, einem gesellschaftlichen Leitbild, das die Hektik zum Standard erhebt, konsequent zuwiderzuhandeln.

In den letzten Kapiteln zur Therapie der Krankheit präsentiert Reheis zunächst die lieb gewordenen Lösungen der Vergangenheit: Über eine allgemein anerkannte Autorität (die katholische Lösung) oder durch demokratische Willensbildung (die sozialdemokratische Lösung) wird den gesellschaftlichen Prozessen eine dem menschlichen Eigenrhythmus zuträgliche Höchstgeschwindigkeit verordnet, an die sich alle zu halten haben. Es ehrt den Autor, dass er diese Lösungen, die ihm – und mir – gefühlsmäßig sympathisch sind, als untauglich verwirft. Langsamkeit ist kein Wert an sich; auch ich bin nicht bereit, mir den Spaß an einer spontanen Fernreise oder einem Quickie verderben zu lassen – schon gar nicht vom Erzbischof.

Wie aber sollen dann die zurzeit verkannten Werte der Muße, der Seelenruhe und des selbstbestimmten Lebens wieder ihren Platz im öffentlichen Bewusstsein gewinnen? Reheis nennt mehrere Bewegungen, welche die Entschleunigung anstreben, zumindest als eines unter mehreren Zielen. Dass die Genießervereinigung »Slow food« und die Globalisierungskritiker der Organisation »attac« sich vor denselben Karren spannen lassen könnten, wirkt zwar einigermaßen komisch. Auch die anderen von Reheis aufgeführten Pflänzchen sind alle noch sehr zart. Aber dafür kann er nichts. Eher ist es ihm hoch anzurechnen, dass er der noch kaum entwickelten öffentlichen Diskussion Anstöße gegeben hat.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Zentralprojektion des 24-Zells im Kantenmodell

Vom R4 zum R5 und darüber hinaus

Zweiter Teil der Reise in die vierte Dimension: Hausbackene Abbildungsmethoden und die Lineare Algebra helfen uns dreidimensionalen Wesen, einen Begriff von höheren Welten zu bekommen.

Von Christoph Pöppe

Was bisher geschah:
In einem alten R4 auf dem Weg nach Berlin finde ich mich unversehens im $\mathbb{R}^4$ wieder, dem vierdimensionalen Raum, von dem unser vertrauter Raum, der $\mathbb{R}^3$, nur einen verschwindend dünnen Teil ausmacht. Dessen Bewohnerinnen besichtigen mich intensiv und stellen unter anderem fest, dass man mich knicken kann, ohne dass ich ernstlich Schaden nehme – und zwar um eine ganze Knickebene. Ihre Belustigung weicht mit der Zeit tief empfundenem Mitleid über meine körperliche wie geistige Beschränktheit. Erst mit Hilfe der abstrakten Mathematik gelingt es, einige der Beschränkungen zu überwinden.

Nicht umsonst hatten meine Freundinnen aus dem $\mathbb{R}^4$ mir als ersten ihrer platonischen Körper das 120-Zell vorgeführt, jenes Prachtstück aus 120 (dreidimensionalen) Dodekaedern, die zu dritt um jede der 1200 Kanten und zu viert um jede der 600 Ecken liegen.

Wie bei den Geometern üblich, legen sie Wert auf Symmetrie. Das 120-Zell ist nicht nur als lauter gleichen Bestandteilen aufgebaut, die ihrerseits aus lauter gleichen Teilen bestehen, es ist auch eckentransitiv, das heißt, alle Ecken samt ihren Umgebungen sind gleich in einem verschärften Sinne: Zu zwei beliebigen Ecken gibt es eine Drehung, welche die eine Ecke in die andere und den ganzen Körper in sich selbst überführt. Damit verfügt das 120-Zell über dasselbe Ausmaß an Symmetrie wie die bekannten fünf platonischen Körper in drei Dimensionen: Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Ikosaeder und Dodekaeder.

Aber Symmetrie allein kann ziemlich langweilig sein. Der symmetrischste Körper überhaupt ist in drei wie in vier Dimensionen die Kugel, denn sie wird von jeder Drehung um ihren Mittelpunkt in sich selbst übergeführt. Eckentransitiv ist sie auch – keine Kunst für einen Körper, der keine Ecken hat. Ein Geometer schätzt es, wenn seine Gegenstände außer symmetrisch auch kompliziert und eindrucksvoll sind, eine Eigenschaft, die das 120-Zell in besonderem Maße erfüllt.

Erst später und mehr der Vollständigkeit halber rückten meine neuen Bekannten mit der Auskunft heraus, dass es in ihrer »höheren Welt« genau sechs verschiedene platonische Körper gibt – einen mehr als in drei Dimensionen, wie sie im Bewusstsein ihrer Überlegenheit hinzufügten. Außer dem 120-Zell handelt es sich um

- das 5-Zell aus fünf Tetraedern;
- das 8-Zell aus acht Würfeln, auch »Tesserakt« oder »Hyperwürfel« genannt, weil er in seiner Welt wie unser Würfel die Rolle eines Grundbausteins spielt; insbesondere kann man den $\mathbb{R}^4$ lückenlos mit Hyperwürfeln füllen;
- das 16-Zell aus sechzehn Tetraedern;
- das 24-Zell aus 24 Oktaedern (Bild links oben) und
- das 600-Zell aus stolzen 600 Tetraedern; an jeder der 720 Kanten liegen fünf Tetraeder und an jeder der 120 Ecken zwanzig Stück.

Da allerdings musste ich einwenden, dass eine große Anzahl von platonischen Körpern nicht unbedingt ein Anzeichen hoher Raumdimension ist. Immerhin sind in zwei Dimensionen platonische Körper nichts anderes als regelmäßige Vielecke, und davon gibt es unendlich viele, eins für jede Eckenzahl.

Ganz im Gegenteil: Die Bausteine für einen platonischen Körper im n-dimensionalen Raum müssen ihrerseits platonische Körper im $(n-1)$-dimensionalen Raum sein. Da aber nicht alle von diesen als Bausteine taugen – zum Beispiel sind das Ikosaeder im $\mathbb{R}^3$ und alle Vielecke ab dem Sechseck im $\mathbb{R}^2$ »zu dick« und damit unbrauchbar –, müsste die Anzahl der Platonischen mit zunehmender Dimension eigentlich abnehmen. Nur die vielseitige Verwendbarkeit des Tetraeders kehrt für den $\mathbb{R}^4$ diesen Trend um.

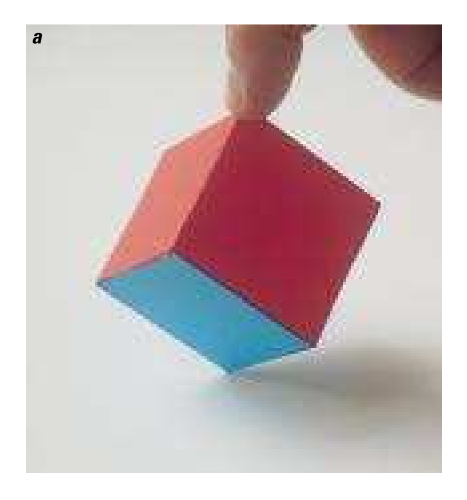
Außerdem musste ich an dieser Stelle die Ehre der beschränkten $\mathbb{R}^3$-Wesen retten: Die sechs besonders regelmäßigen Körper im $\mathbb{R}^4$ hatten sie auch schon gefunden, und zwar bereits im 19. Jahrhundert. Der Ruhm gebührt einem Berner Theologen und Mathematiker mit dem beruhigenden Namen Ludwig Schläfli (1814–1895) sowie dem deutschen Mathematiker Victor Schlegel (1843–1905).

Die Krücke der Linearen Algebra

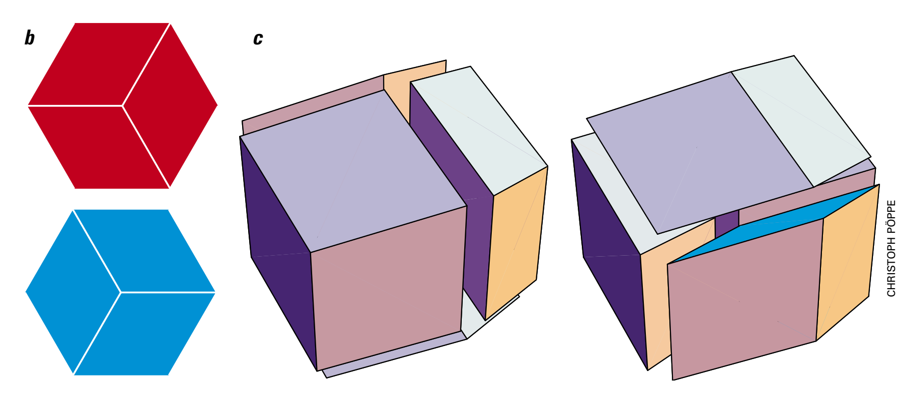
Da horchten die höheren Wesen auf einmal auf. Wie hatten die Dreidimensionalen die unvermeidliche Beschränkung ihres Vorstellungsvermögens überwinden können?

Gute Frage. Wie erlangt man Erkenntnisse höherdimensionaler Welten, wenn man selbst in einer niederdimensionalen Welt lebt? Eine erste Antwort liefert die abstrakte Koordinatengeometrie. Einfach vier statt drei Zahlen für die Angabe eines Punkts zu verwenden und mit diesen Koordinaten zu rechnen ist etwas ungewohnt, aber nicht besonders schwierig. Wie im gewohnten Raum gibt es Geraden und Ebenen, und sie werden durch Gleichungen beschrieben, die den herkömmlichen Geraden- und Ebenengleichungen zum Verwechseln ähnlich sind. Auch die Formeln für die Entfernung zweier Punkte und den Winkel zweier Geraden sehen ziemlich vertraut aus. Dass es dreidimensionale Unterräume gibt, die nicht alle Punkte des Raums enthalten, ist gewöhnungsbedürftig. Aber der Formalismus der Linearen Algebra findet mühelos die Gerade, die auf einem ganzen Unterraum senkrecht steht und durch einen vorgegebenen Punkt geht, oder die Ebene, in der sich zwei Unterräume schneiden, wenn sie nicht gerade parallel sind.

Man spiegelt im $\mathbb{R}^4$ nicht an einer Ebene, sondern an einem ganzen Raum. Drehungen finden nicht, wie im $\mathbb{R}^2$ (der Ebene), um einen Punkt oder, wie im $\mathbb{R}^3$, um eine Achse statt, sondern um eine ganze Ebene. Während im $\mathbb{R}^3$ eine Ebene die Welt in zwei strikt getrennte Hälften zerlegt und es gänzlich unmöglich ist, von der einen Hälfte in die andere zu gelangen, ohne die Ebene zu kreuzen, stört eine Ebene im $\mathbb{R}^4$ den Weg des Wanderers nicht mehr als unsereinen ein – unendlich langer – Laternenpfahl. Man darf halt nicht dagegenlaufen, das ist alles.



◁ **Ein Würfel, auf die Spitze gestellt (*a*) und von oben mit parallelem Licht beschienen, wirft als Schatten in den $\mathbb{R}^2$ (die Ebene) ein doppeltes Sechseck (*b*). Entsprechend werden aus einem vierdimensionalen Würfel durch Zentralprojektion in den $\mathbb{R}^3$ zwei Rhombendodekaeder (*c*), die dasselbe Volumen einnehmen und nur an dessen Oberfläche miteinander Kontakt haben (hier sind deren Komponenten, die Rhomboeder, zur Verdeutlichung etwas nach außen verschoben). Die Projektionen sind so gewählt, dass im Projektionsbild wie im Original alle Kanten gleich lang sind.**



Meine Gesprächspartnerinnen hörten mit ungläubiger Überraschung von $\mathbb{R}^3$-Ländern wie der DDR. Dass ein ganzes Land bis auf wenige sorgfältig kontrollierte Löcher ringsum eingezäunt sein könnte, kam ihnen merkwürdig vor. Aber dann machten sie sich klar, dass ein Zaun um ein ganzes Land eine im Wesentlichen eindimensionale Angelegenheit ist, da wir wegen der Schwerkraft schon über unsere dritte Dimension nur mit hohem Aufwand verfügen können. In ihrer Welt dagegen müsste man ein Land mit einem riesig ausgedehnten Stacheldrahtkäfig umgeben, um seine Bewohner einzusperren, und die könnten den Käfig dann immer noch überfliegen – ◆fliegen, um genau zu sein. (Die Zeichen ◆ und ♦ stehen für die beiden zusätzlichen Richtungen im $\mathbb{R}^4$; siehe die letzte Folge.)

Nein, jemanden einzusperren oder auch nur etwas stoßsicher zu verpacken ist sehr mühsam im $\mathbb{R}^4$. Während bei uns ein Karton mit sechs flächenhaften Stücken Wellpappe auskommt (vier Wände, Boden und Deckel), müssen es im Vierdimensionalen immer gleich acht sein, und zwar nicht bloß dünne Pappedeckel, sondern richtige (dreidimensionale) Quader. Entsprechend aufwändig sind die Häuser der $\mathbb{R}^4$-Menschen.

Dafür sind die Verkehrsverbindungen im $\mathbb{R}^4$ hervorragend. Straßen oder Bahnlinien kommen einander nicht mehr in die Quere als bei uns die Laternenpfähle. Mit dem doppelten Zeitaufwand erreiche ich nicht nur viermal so viele Ziele wie bei uns, sondern achtmal, wobei in beiden Fällen unterstellt wird, dass eine Dimension wegen der Schwerkraft nicht zur Verfügung steht. Es gibt wirklich viel Platz im $\mathbb{R}^4$, und das empfinden nicht nur dreidimensionale »Flachmänner« wie ich so, sondern auch die Bewohner selbst.

Nachdem meine Freundinnen mich schon aus meinem $\mathbb{R}^3$ ◆wärts herausgehoben hatten, hätten sie mich ungeachtet aller Zäune wieder irgendwo in meinem vertrauten Raum absetzen können, gerne auch spiegelverkehrt, denn was man in drei Dimensionen nicht wirklich tun kann – einen Menschen durch sein exaktes Spiegelbild zu ersetzen –, das ist im $\mathbb{R}^4$ eine einfache Halbdrehung um eine Ebene. Ich würde allerdings eine solche Umsetzung nicht lange überleben, denn alle organischen Moleküle in mir hätten dann den falschen Drehsinn und ▷

▷ kämen mit Nahrungs- und anderen Stoffen nicht mehr zurecht.

Schöner als die abstrakte Koordinatendarstellung ist es, dem Vorstellungsvermögen direkt aufzuhelfen. Man möchte Dinge aus höheren Dimensionen so in die niedrigeren abbilden, dass die »Flachmänner« (und die Flachfrauen natürlich auch) durch bloßes Hinschauen erleuchtet werden.

Erleuchtung von ◆: Projektion

Eine dieser Abbildungsmethoden, die Zentralprojektion, war Thema der letzten Folge. Der erwähnte Victor Schlegel kannte und verwendete sie auch schon, weswegen diese Projektionsbilder heute Schlegel-Diagramme heißen.

Statt einer punktförmigen Lichtquelle knapp ◆halb des beleuchteten Körpers kann man auch paralleles Licht verwenden, das von ◆ auf den $\mathbb{R}^3$ herab- (genauer: ◆wärts) scheint. Wieder hilft zum Verstehen das Analogon eine Dimension tiefer.

Man stelle einen gewöhnlichen Würfel so auf eine Ecke, dass die gegenüberliegende Ecke genau darüber liegt, und beleuchte ihn mit parallelem Licht von oben (Bild auf der vorigen Seite, *a*). Diese Parallelprojektion ergibt ein Sechseck, genauer gesagt: deren zwei, die genau dieselbe Fläche einnehmen (*b*). Jedes Sechseck besteht aus drei Rauten; das sind die durch die Projektion verzerrten Seitenflächen des Würfels. $\mathbb{R}^2$-Menschen brauchen sich jetzt nur noch vorzustellen, dass die beiden Sechsecke, die dieselbe Fläche einnehmen, nur an ihrem gemeinsamen Rand Kontakt haben. An diesem Modell können sie ohne Weiteres bestätigen, dass sich in jeder Ecke drei Quadrate treffen, ohne Lücken zwischen sich zu lassen – auch wenn sie es sich eigentlich nicht vorstellen können.


ALICE KRÜSSMANN

Schiffbruch mit dem R5


GERHARD TRAGESER

Die Parallelprojektion des (6,6)-Biprismachors füllt ein räumliches Volumen doppelt. Hier gezeigt ist eine der beiden Füllungen; sie enthält jeweils die Hälfte der beiden Sechserringe sechsseitiger Prismen, die sich umeinander winden.

Wenn man entsprechend einen vierdimensionalen Hyperwürfel so auf eine Ecke stellt, dass die gegenüberliegende Ecke genau ◆halb dieser Ecke liegt, und von ◆ mit parallelem Licht bescheint, werden alle acht (gewöhnlichen) Würfel zu so genannten Rhomboedern verzerrt. Vier von ihnen bilden zusammen ein Rhombendodekaeder, einen Körper, der von zwölf Rauten begrenzt ist. Die restlichen vier Würfel bilden ebenfalls ein Rhombendodekaeder, das dasselbe Volumen einnimmt wie das erste und mit diesem nur an seiner Oberfläche Kontakt hat (*c*). An diesem Modell können wir ohne Weiteres bestätigen, dass sich in jeder Ecke vier Würfel treffen, ohne Lücken zwischen sich zu lassen – auch wenn wir uns das eigentlich nicht vorstellen können.

Nach demselben Prinzip veranschaulicht man sich auch die (hohle) Kugel im $\mathbb{R}^4$, die so genannte 3-Sphäre. In der Parallelprojektion wird sie zu zwei gewöhnlichen Vollkugeln, die dasselbe Volumen einnehmen und die man sich als an ihrer gemeinsamen Oberfläche miteinander verklebt vorzustellen hat (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86).

Die dritte Veranschaulichungsmethode wird bei uns wie bei den $\mathbb{R}^4$-Menschen in Bauplänen praktiziert: Ein Flachmann legt in Gedanken einen ebenen Schnitt durch den abzubildenden Gegenstand und zeichnet auf ein Stück Papier nur das, was in dieser Ebene liegt.



Ein $\mathbb{R}^4$-Mensch legt stattdessen einen gedachten Raum durch den Gegenstand und dokumentiert das, was sich in diesem Raum befindet, in einem Klotz Papier; deswegen sprechen die $\mathbb{R}^4$-Leute von »aufklotzen« statt »aufzeichnen«.

Für uns $\mathbb{R}^3$-Menschen ist ein dreidimensionaler Schnitt hilfreich. Wie man in dem 120-Zell die Dodekaeder so gegeneinander faltet, dass die Lücken zwischen ihnen verschwinden, geht einem Flachmann nicht in seinen Flachkopf. Aber ein geeignet gelegter Schnitt macht aus dem Winkel dieser Faltung einen Winkel in einem gewöhnlichen (dreidimensionalen) Raum.

So gewinnt man zum Beispiel ein Verständnis für die archimedischen Körper in vier Dimensionen. Archimedische Körper sind etwas weniger regelmäßig als platonische. Zwar wird nach wie vor die Eckentransitivität verlangt; aber die Bauteile eine Dimension niedriger brauchen nicht mehr alle gleich und nur noch archimedisch statt platonisch zu sein. In drei Dimensionen gibt es zwei unendliche Klassen von Körpern, die diese Bedingungen erfüllen:

- die Prismen (ein *n*-Eck als Boden, ein weiteres *n*-Eck als Deckel und lauter quadratische Wände zwischen Boden und Deckel);
- die Antiprismen (Boden und Deckel sind gegeneinander um eine halbe *n*-Ecksseite verdreht und durch gleichseitige Dreiecke im Zickzack miteinander verbunden).

Darüber hinaus gibt es dreizehn spezielle archimedische Körper mit Namen wie Tetraederstumpf und Kuboktaeder.

Aus diesem reichhaltigen Sortiment können also die archimedischen Körper im $\mathbb{R}^4$ gebaut werden. Die Möglichkeiten dafür hat Marco Möller von der Universität Hamburg in seiner Dissertation erkundet. Das Ergebnis ist: Neben den

schon genannten platonischen Körpern, die natürlich auch das Kriterium »archimedisch« erfüllen, gibt es 41 im engeren Sinne archimedische Polychora (ein »Polychor« ist die Verallgemeinerung eines Polyeders auf vier Dimensionen) sowie abermals zwei unendliche Klassen, die »prismatischen« und die »biprismatischen Polychora« (Bild links).

Ein biprismatisches (m, n)-Polychor oder kurz (m, n)-Biprismachor entsteht aus m aufeinander gestapelten n-seitigen Prismen. Dieser Turm wird im $\mathbb{R}^4$ so zurechtgeknickt, dass Boden und Deckel zusamenfallen. Jede der n Seitenwände des gesamten Turms besteht aus m Quadraten, die zu einem Ring geschlossen sind. Das sind die Seitenwände eines m-seitigen Prismas, von dem n Exemplare das Polychor vervollständigen.

Der bekannteste Vertreter dieser Gruppe ist das (4, 4)-Biprismachor; das ist nämlich der vierdimensionale Hyperwürfel. Je größer m und n sind, desto mehr nähert sich das Biprismachor der (Hyper-)Kugelform.

Die Grundidee von Möllers Verfahren ist fast wie Basteln mit Karton, allerdings im $\mathbb{R}^4$. Man füge mehrere potenzielle Bausteine aus dem $\mathbb{R}^3$ so zusammen, dass sie alle eine Ecke gemeinsam haben und mit gleichen Flächen aneinander grenzen. Dabei darf zwischen Paaren gleicher Flächen eine keilförmige Lücke offen bleiben, wie wir sie bei den Dodekaedern des 120-Zells gesehen haben. Jetzt faltet man in Gedanken die Bausteine im $\mathbb{R}^4$ so gegeneinander, dass die Lücken sich schließen – was man sich nicht mehr vorstellen kann. Aber indem man durch die Anordnung einen geeigneten Schnittraum legt, kann man den Faltwinkel bestimmen.

Jenseits des $\mathbb{R}^4$

Man fälle nun das Lot auf jeden der Bausteine in dessen Mittelpunkt. Das geht, denn wir sind ja in vier Dimensionen! Damit es ein archimedisches Polychor wird, müssen alle diese Lote sich in einem Punkt treffen, der dann der Mittelpunkt des Polychors ist. Mit Hilfe dieser Bedingung und eines Computerprogramms fand Möller eine lange Liste von »Eckenumgebungen«, das heißt Ensembles von einer Ecke anliegenden Polyedern, die sich möglicherweise zu einem Polychor ergänzen lassen, und testete dann jede Eckenumgebung daraufhin, ob eine solche Ergänzung möglich ist.

Meine Gesprächspartnerinnen aus dem $\mathbb{R}^4$ wurden etwas einsilbig. Sicher war ihnen das eine oder andere archimedische Polychor aus der Liste geläufig, aber die vollständige Aufzählung hatten sie nicht der Mühe für wert befunden.

Als ich dann aber, einmal in Fahrt gekommen, vom $\mathbb{R}^5$ zu reden begann, gab es richtig Ärger. Dass man den fünfdimensionalen Raum ebenso mit Koordinaten beschreiben könne wie den ihren – man braucht eben fünf statt vier reelle Zahlen zur Beschreibung eines einzigen Punkts –, wollte ihnen absolut nicht einleuchten, ebenso wenig, dass es im $\mathbb{R}^5$ nur noch drei platonische Körper gibt. Das sei doch völlig offensichtlich, dass ihr Raum nicht fünf, sondern genau vier Dimensionen habe. Und wie man sich, bitte schön, vorstellen solle, dass es einen Vektor geben könne, der auf allen vier Koordinatenrichtungen senkrecht steht …

Ich kam nicht mehr dazu, ihnen von dem fünfdimensionalen Hyperwürfel zu erzählen, und welch interessante Bilder sich ergeben, wenn man durch eine Raumfüllung des $\mathbb{R}^5$ mit Hyperwürfeln auf geschickte Weise Ebenen legt. Man gab mir zunehmend deutlicher zu verstehen, dass man mich, diesen aufgeblasenen Flachmann, für einen ziemlich nervigen Spinner hielt. Mit meinen Vorstellungen zum $\mathbb{R}^5$ hatte ich offensichtlich Schiffbruch erlitten.

Ich wurde unsanft wieder im $\mathbb{R}^3$ abgesetzt und fand mich in Berlin-Wannsee wieder. Irgendwie hatte ich nichts mitbekommen von dem Zaun, der inzwischen ohnehin verschwunden ist.

Wenn diese höheren Wesen wüssten, dass es über den $\mathbb{R}^5$ hinaus nicht nur einen $\mathbb{R}^9$ und einen $\mathbb{R}^{19}$ gibt (inzwischen gibt Renault seinen Autotypen andere Namen), sondern einen $\mathbb{R}^n$ für jede natürliche Zahl n … ◁



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Vierdimensionale Archimedische Polytope. Von Marco Möller. Dissertation, Universität Hamburg 2004

Regular Polytopes. Von Harold S. M. Coxeter. 3. Auflage, Dover, New York 1973

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Medikamente für die Armen

Die Biomedizin des 21. Jahrhunderts darf nicht nur für die Minderheit der Wohlhabenden forschen.

Von Heiner Schirmer

Alljährlich sterben über 25 Millionen Menschen vorzeitig an Mangelernährung und anderen heilbaren Krankheiten wie Tuberkulose oder akuter Lungenentzündung. Die Menschen sterben auch deshalb, weil sie keinen Markt darstellen und in unserer ökonomisch geprägten Welt eben nicht dazugehören.

Ein besonders eindrückliches Beispiel bietet die Malaria. Diese Tropenkrankheit kann vor allem bei Kindern, Schwangeren und Touristen tödlich verlaufen oder lebenslange Behinderungen zur Folge haben. Mit neueren Medikamenten lässt sich eine Infektion behandeln oder verhüten. Wegen ihres Preises – mehr als zwei Euro pro Patient – sind sie jedoch den Touristen und anderen Wohlhabenden vorbehalten.

Für die meisten der fast 1,5 Milliarden Menschen im Verbreitungsgebiet der Malaria aber ist und bleibt sie eine wesentliche Ursache der Armut; gerade hier ist der Teufelskreis von Armut und Krankheit besonders ausgeprägt. Armut geht in aller Regel mit dem Verlust aller Menschenrechte einher, des Rechts auf ärztliche Versorgung, auf adäquate Nahrung, auf Bildung und auf jegliche Gerechtigkeit. Franklin D. Roosevelt, US-Präsident von 1933 bis 1945, nannte das epidemische Ausmaß der Armut die größte Schande der Welt. Nach wie vor wütet sie wie eine Seuche vor allem in den Entwicklungsländern, breitet sich aber auch in westlichen Industrienationen immer mehr aus.

Kann die Wissenschaft etwas gegen diesen Makel der Menschheit tun? Gehört vielleicht die Bekämpfung der Armutsursachen sogar zu ihrer Aufgabe, wie schon Adolf von Harnack, der Begründer der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (der heutigen Max-Planck-Gesellschaft) verlangte? Am eindringlichsten formulierte es Berthold Brecht in seinem Drama »Leben des Galilei«: »Ich halte dafür«, lässt er Galileo Galilei sagen, »dass das einzige Ziel der Wissenschaft darin besteht, die Mühseligkeit der menschlichen Existenz zu erleichtern.«

Führende Wissenschaftler, namentlich der einflussreiche Medizinnobelpreisträger Sir Archibald Hill, forderten unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg, dass der hippokratische Eid für alle Wissenschaften verbindlich werden müsse. Substanzieller Inhalt des Eides ist, dass der Arzt seine Wissenschaft und seine

Zurzeit ist es möglich, glänzende Staatsexamina zu machen, ohne irgendeinen Bereich der medizinischen Ethik zu kennen. Dies ist in den Naturwissenschaften nicht anders. Sollte es nicht möglich sein, dass in eine Prüfung auch ethische Implikationen der Wissenschaft Eingang finden?

Kunst ausschließlich zum Wohle des Patienten entwickeln und nutzen darf, nicht aber zu dessen Schaden – und dass dies für alle Patienten gilt, unabhängig von sozialer Klasse, Nationalität, Geschlecht oder Alter.

In den beiden letzten Jahrzehnten sind Zweifel aufgekommen, ob die Medizin als Wissenschaft noch dem hippokratischen Eid verpflichtet sein kann. Mehren sich doch die Anzeichen für eine globale Apartheid sowohl bei der Krankenversorgung als auch bei den Prioritäten, welche die medizinische Forschung setzt. Nicht einmal ein Prozent aller neuen Medikamente, die zwischen 1975 und 2000 die Zulassung erhielten, wurden spezifisch für Krankheiten entwickelt, unter deren Last sich die Dritte Welt quält. In Zahlen: 10 von 1360 Präparaten!

Selbstverständlich sind auch die übrigen 1350 Medikamente hilfreich – aber man muss schon genauer auf die Indikationen sehen. Denn die Schwerpunkte in der medizinischen Forschung verlagern sich immer mehr fort von den Problemen leidvoller Krankheiten und tödlicher Bedrohungen. Der Trend geht stattdessen zur Entwicklung so genannter Lifestyle- und Performance-Präparate wie beispielsweise Viagra, Xenical, Propecia, Vaniqa und Botox. Dies sind sehr teure, verschreibungspflichtige Mittel – gegen Erektionsstörungen, Übergewicht, Kahlköpfigkeit sowie unerwünschten Haarwuchs und Falten im Gesicht.

Selbstverständlich will keiner von uns, dass Männer in irgendeiner Situation Potenzschwierigkeiten haben oder dass Frauen unter Falten und Barthärchen leiden. Aber es ist doch symptomatisch für die Prioritäten der Medizin als Wissenschaft, wenn für Forschung und Entwicklung im Bereich »Lifestyle des Menschen und seiner Tierkameraden« fast eine Milliarde Dollar im Jahr aufgewendet wird. Im Vergleich dazu kann man die Mittel der Forschungsförderung zur Bekämpfung und Behandlung der großen Infektionskrankheiten vernachlässigen.

Ein »Auferstehungsmedikament«

Die Defizite der Verteilungsethik in der Wissenschaft möchte ich am Beispiel des Wirkstoffs Eflornithin (Difluormethylornithin) illustrieren, weil es repräsentativ ist und weil ich diesen schmerzhaften und noch sehr aktuellen Konflikt unmittelbar miterlebt habe.

Die Geschichte beginnt im Jahre 1990. Damals kündigte der Pharmakonzern Marion-Merrel-Dow an, Eflornithin als Medikament zu produzieren. Es war das erste neue Mittel seit vierzig Jahren gegen die Erreger der Afrikanischen Schlafkrankheit. Diese entsetzliche Infektion des Gehirns verläuft tödlich, wenn sie nicht behandelt wird. Die Weltgesundheitsorganisation feierte Eflornithin als »resurrection drug«, als Auferstehungsmedikament. Seit Lazarus, so hieß es in dem bewegenden Bericht eines Missionskrankenhauses, habe man keine so dramatische Wirkung bei todgeweihten Patienten gesehen. 1990 erschien es möglich, nach den Pocken eine weitere große Krankheit der Menschheit auszurotten.

Etwa zwei Jahre nach der hoffnungsvollen Ankündigung und den beeindruckenden Therapieerfolgen meldete der Konzern, dass die Produktion von Eflornithin wieder eingestellt werde: Mit 300 Dollar pro Behandlung war das Medikament viel zu teuer für die Patienten, die es brauchten. Die eigentliche »Zielgruppe« – die Soldaten der Stellvertreterkriege – wurde Anfang der 1990er Jahre im Zuge der weltweiten Entspannung aus Afrika abgezogen.

Im Herbst 1999, als die letzten Ampullen des Medikaments verteilt wurden, kündigte sich ein Wunder an. Unbemerkt von der Fachwelt war eine neue Produktionsstätte für Eflornithin entstanden. Zusammen mit dem ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Kaum ein neues Medikament wird spezifisch für Krankheiten entwickelt, unter deren Last die Dritte Welt sich quält.

Das beste Medikament gegen die Schlafkrankheit wurde jahrelang nicht mehr produziert – zu teuer: Die meisten Kranken in der Dritten Welt hätten es nicht bezahlen können.

Rasur-Riesen Gillette hatte der Pharmakonzern Bristol-Myers-Squibb eine Gesichts-Enthaarungscreme entwickelt: Das verschreibungspflichtige Kosmetikum Vaniqa ist 13,9-prozentiges Eflornithin. Wie häufig bei potenziellen Rennern des Lifestyle-Marktes – man denke nur an Viagra – durchlief das Präparat in wenigen Monaten das sonst zeitlich so aufwändige und strenge Genehmigungsverfahren der amerikanischen Zulassungsbehörde. Allein in Amerika rechnen Experten mit zehn Millionen Patientinnen, die bereit sind, in regelmäßigen Abständen mehr als 50 Dollar Behandlungskosten zu zahlen.

Die rasche Einführung von Vaniqa war auch deshalb möglich, weil der enthaltene Wirkstoff für seinen Einsatz bei der Schlafkrankheit bereits aufwändige Tests am Menschen durchlaufen hatte. Seine Sicherheit war geprüft, als eine der damals unerwünschten Nebenwirkungen hatte man Störungen des Haarwuchses beobachtet – nun bei der Creme der gerade lokal erwünschte Effekt. Die »Vorarbeit« ersparte den Unternehmen Kosten für klinische Studien in Höhe von mehr als 100 Millionen Dollar. Dies impliziert sicherlich eine moralische Verpflichtung gegenüber den Patienten, Wissenschaftlern und Ärzten, die an den damaligen Studien beteiligt waren. Bisher hat der Konzern Präparate und Know-how im Wert von etwa acht Millionen Euro für die Behandlung der Schlafkrankheit in Aussicht gestellt. Dies erscheint nicht mehr als eine großzügige Geste – aber Großzügigkeit ist oft der Anfang der Gerechtigkeit.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Ein anderer Aspekt der Geschichte: Im Mai 2001 nahm die Konkurrenz – Aventis, die damalige Eignerin von Marion-Merrel-Dow – die Eflornithin-Produktion wieder auf und kündigte an, fünf Jahre lang unentgeltlich Präparate gegen Schlafkrankheit zur Verfügung zu stellen. Für dieses aus medizinischer und ethischer Sicht gute Zeichen gibt es sicher mehrere Gründe. Einer mag der Druck seitens der Weltgesundheitsorganisation, vor allem aber der Organisation »Ärzte ohne Grenzen«, gewesen sein. Die Aussicht, Eflornithin auch in einem Edel-Kosmetikum für einen gewinnträchtigen Markt nutzen zu können, dürfte das ihre beigetragen haben. Nicht zuletzt aber bestehen inzwischen die Aktionäre der Pharmariesen immer öfter und nachdrücklicher darauf, dass ihr Konzern nicht nur durch schillernde Produktpaletten oder dunkle Schatten der Vergangenheit auf sich aufmerksam macht, sondern auch mit ethisch hochwertigen Leistungen, vielleicht sogar mit »ethischen Präparaten«.

Eine Ökonomie der unterlassenen Hilfeleistung

Ethische Präparate – ein fast vergessener und verdrängter Begriff – sind Medikamente, die keinen Gewinn einbringen, aber dennoch produziert werden, weil sie zur Verhütung und Behandlung bestimmter Krankheiten nötig sind. Die pharmazeutische Industrie hatte die Forschung an solchen Präparaten im letzten Jahrzehnt weltweit fast vollständig eingestellt. Ein Grund: Bei den großen Fusionen von Unternehmen fielen die Abteilungen für ethische Präparate der Synergie zum Opfer – eher unabsichtlich und unauffällig, aber sehr regelmäßig. Die spektakuläre Übernahme von Aventis durch Sanofi-Synthélabo im Frühjahr 2004 ist der aktuelle Testfall. Wird der französische Konzern die Zusage von Aventis einhalten, Medikamente gegen die Schlafkrankheit bereitzustellen? In Zeiten multinationaler Globalisierungsstrategien wage ich daran zu erinnern, dass das Image der deutschen Industrieforschung weltweit durch ethische Präparate geprägt war. Seit Ende des 19. Jahrhunderts galten deutsche Firmen in vielen Ländern als Protagonisten, deren Forschung und Entwicklung im Dienste der Gesundheit der Menschheit standen.

Das bekannteste Beispiel ist das Präparat Bayer 205, das am Hamburger Tropeninstitut getestet und dann in den Jahren 1921 bis 1923 von deutschen Ärzten und britischen Behörden in Südafrika und Rhodesien erfolgreich in der Frühbehandlung der Schlafkrankheit eingesetzt wurde. Später hieß es Germanin und auch heute noch spielt es als Suramin

eine wichtige Rolle in der Behandlung von Tropenkrankheiten. (Der 1943 gedrehte Abenteuerfilm Germanin der UFA hat mit den medizinischen und historischen Fakten wenig gemeinsam.)

Wie das Eflornithin-Beispiel von Aventis und ähnliche positive Aktivitäten anderer Konzerne zeigen, stehen seit etwa zwei Jahren Arbeiten an ethischen Präparaten und damit vielleicht auch die wissenschaftliche Ethik vor einem Comeback. Optimismus ist notwendig – und berechtigt: Die Wissenschaft des 21. Jahrhunderts wird nicht der Versuchung nachgeben, die Ökonomie der unterlassenen Hilfeleistung und des Sterbenlassens der Armen zum Programm zu machen, wie es noch Ende des letzten Jahrhunderts zu befürchten war.

Nach wie vor gilt aber ein erschwinglicher Preis als eines der wichtigsten Ziele bei der Entwicklung von Medikamenten gegen Krankheiten der Armut. Denn sonst sind Wissenschaft und Medizin zu unterlassener Hilfeleistung verurteilt. Mögliche medizinische Hilfe zu versagen, stellt aber einen der schwersten Verstöße gegen den hippokratischen Eid dar. Ziel unserer Arbeitsgruppe am Biochemie-Zentrum der Universität Heidelberg ist es daher, wirksame Medikamente mitzuentwickeln, die für die Patienten auch bezahlbar sind. Ein wichtiger Aspekt: Die Wirkstoffe selbst oder ähnliche Substanzen sollten möglichst schon für andere Indikationen in Klinik und Praxis zugelassen sein. Dadurch lassen sich die horrenden Kosten für klinische Studien – in der Regel mehrere 100 Millionen Euro – reduzieren. Solche Summen stellen nach wie vor die Neuentwicklung ethischer Präparate schon von vornherein in Frage.

Die Bioethik mit dem Schwerpunkt Reproduktionsmedizin beschäftigt sich bisher mit den exzentrischen Problemen einer winzigen privilegierten Gruppe. »Bioethik beginnt dort, wo die Ethik aufhört« (Hans-Jochen Diesfeld 2003)

Zwei Kategorien von Wissenschaft

Der Vergleich der Forschungsbereiche Lifestyle und Performance einerseits sowie Armut und Krankheit andererseits führt zu immer eindringlicher gestellten Fragen. Nach welchen Kriterien werden wissenschaftliche Vorhaben ausgewählt und finanziell gefördert? Wem kommen die Ergebnisse der Forschung zugute? Wem schaden sie?

Wie aber die eklatante Verteilungsungerechtigkeit bei Forschungsförderung und Forschungsergebnissen aufheben? Dazu könnte es hilfreich sein, den ethischen Anspruch auf Einheit der Wissenschaft aufzugeben und offiziell zwei Kategorien zu schaffen – die eigentlich schon Realität sind. Einerseits sollte sich eine ethikferne oder ethikfreie Forschung definieren, die keine ethischen Imperative wie den hippokratischen Eid hat. Auf den biomedizinischen Bereich bezogen, wäre dies die Elitenforschung im Auftrag und zu Gunsten der »Happy Few«, jener weltweit verbreiteten wohlhabenden Minoritäten, die sich vieles oder sogar alles leisten können, was Forschung, Technik und exotische Alternativmedizin auf den Gesundheits- und Lifestyle-Markt bringen. Die ethiknahe Wissenschaft andererseits wäre die herkömmliche, die im Dienste der Menschheit oder der reinen wissenschaftlichen Erkenntnis eine untrennbare Einheit von Forschung und Ethik bildet.

Diese transparente Klassen-Wissenschaft mit durchlässigen Grenzen kann eine Rückkehr der Medizin zu ethischen Standards mit globaler Gültigkeit im Sinne der von Archibald Hill geforderten positiven Moralität ermöglichen. Forschungsfördernde Stiftungen wie die Bill & Melinda Gates Foundation, die Volkswagenstiftung oder das »Dream Action Program« des niederländischen Chemiekonzerns DMS, aber auch einige Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft haben hier in den letzten Jahren Maßstäbe gesetzt. Der dynamische und fortschreitende Konsens zwischen ethiknaher und ethikfreier Forschung wird schließlich eine Form der Wissenschaftsethik entstehen lassen, die für alle Naturwissenschaften gelten kann – so wie es Archibald Hill und führende Chemiker und Physiker seiner Zeit gefordert haben.

Schließen möchte ich mit einem Zitat aus der zweiten, 1937 gehaltenen Antrittsrede von Präsident Roosevelt: »Der Test für unseren Fortschritt ist nicht, ob wir noch mehr zum Überfluss derer hinzufügen, die viel haben; der Test ist, ob wir genug für jene bereitstellen, die zu wenig haben.« Roosevelt sprach damals über den Fortschritt allgemein, dieser Satz aber, ebenso prägnant wie faszinierend, sollte insbesondere für den wissenschaftlichen Fortschritt gelten. Hier steht ein moralpolitisches Postulat, dessen Realisierung der Wissenschaft bedarf. Für die Wechselwirkung von Ethik und Wissenschaft stellt sich somit auch die Frage: Welche und wie viel Wissenschaft braucht die Ethik, um moralisch wirken zu können? ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Der Arzt und Wissenschaftler **Heiner Schirmer**, Professor am Biochemie-Zentrum der Universität Heidelberg, hat zahlreiche Arbeiten über biochemische Grundlagen der Medikamentenforschung veröffentlicht.

Moral und Verteilungsethik des medizinischen Fortschritts. Von H. Schirmer und C. Borck in: Ethisierung – Ethikferne. Wie viel Ethik braucht die Wissenschaft? S. 119. Von K. Becker et al. (Hg.). Akademie Verlag, Berlin 2003

Afrikanische Schlafkrankheit – die Karriere eines Medikaments. Von A. Stich und A. Firmenich in: Deutsches Ärzteblatt, Bd. 98, 1735, 2001

Scientific Ethics. Von A. V. Hill in: Chemical and Engeneering News, Bd. 24, S. 1343, 1946

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das Universum als Computer

Werden physikalische Gesetze als Rechenanweisungen für die Natur betrachtet, so verhält sich das Universum wie ein gigantischer Computer. Die Frage ist nur, ob Schwarze Löcher dieses grandiose Bild nicht empfindlich stören

KENN BROWN

WEITERE THEMEN IM JANUAR

Mythos Pest

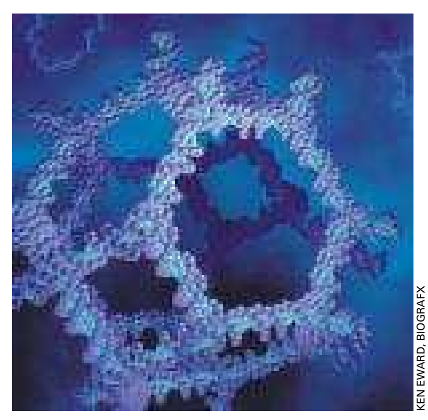
War der schwarze Tod – Inbegriff einer verheerenden Seuche – wirklich so schrecklich wie oft angenommen?



PAUL SHAMBROOM

Löchriger Schutzschirm

Die nationale Raketenabwehr der USA, die einzelne feindliche Sprengköpfe noch im Anflug zerstören soll, erfordert einen gigantischen Aufwand. Doch die Mühe ist vermutlich vergebens, wie Studien von US-Physikern belegen



KEN EWARD, BIOGRAFX

Die DNA als Nanoschalter

Unsere Erbsubstanz hatte Jahrmillionen Zeit, sich zu optimieren. Nun sollen ihre raffinierten Eigenschaften der Nanotechnik zugute kommen

Nicht nur zur Weihnachtszeit

Durch den Ausstoß von Treibhausgasen haben wir auf jedem Quadratmeter der Erdoberfläche quasi zwei elektrische Christbaumkerzen angezündet (Lichtpunkte im Bild). Trotz ihrer geringen Wärmeleistung heizen sie die Erde auf



RANDY HARRIS